

Grundgestell aus hydraulisch gebundenem Beton mit abgeformten Führungsflächen für aerostatische Führungen

BACHELORARBEIT

Vorgelegt von
René Bernau

Matrikelnummer
39632

Matrikel
2005

Ausgegeben am
01.09.2009

Fertig gestellt zum
30. November 2009

Verantwortlicher Hochschullehrer
Prof. Dr.-Ing. R. Theska

Betreut von
Dipl.-Ing. Król
Dipl.-Ing. Erbe
Dr.-Ing. K. A. Bode (BUWE)
Dr.-Ing. F. Spiller (IMMS)

Ilmenau 2009

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema:

„Grundgestell aus hydraulisch gebundenem Beton mit abgeformten Führungsflächen für aerostatische Führungen“

selbstständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Werken wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet.

Ilmenau, 30.11.2009

René Bernau

Danksagung

Einen großen Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. René Theska für die Themenvergabe und die Betreuung dieser Bachelorarbeit.

Vielen Dank an Dr. Frank Spiller, der mich während meiner Arbeit im Unternehmen *IMMS gGmbH* betreut hat.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Dipl.-Ing. Torsten Erbe, Dipl.-Ing. József Król und Dipl.-Ing. Marko Heyne für die ständige Hilfe und Unterstützung während der gesamten Bachelorarbeit.

Weiterhin danke ich Dipl.-Ing. Kay Bode und Tom Lehmpfuhl - Bauhaus Universität Weimar - die diese Arbeit tatkräftig unterstützt und zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Herrn Marius Berg möchte ich für wertvolle Unterstützung und Diskussionen während meiner Bachelorarbeit danken.

Weiterhin danke ich Dipl.-Ing. Lars Dittrich, Dr.-Ing. Arne Albrecht, Dipl.-Ing. Eric Markweg, Frau Birgitt Hartmann und Dipl.-Ing. Ulrike Brokmann für die Unterstützung während meiner Bachelorarbeit.

Schließlich möchte ich ganz besonders herzlich bei meiner Familie bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit und meines Studiums in jeder Situation unterstützt haben.

Vielen Dank auch an alle anderen, die ich hier vergessen habe aufzulisten, die mir während meiner Bachelorarbeit geholfen haben.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung des Themas	1
1.2 Präzisierung der Aufgabenstellung	4
1.3 Abgrenzung der Thematik	4
2 Allgemeine Grundlagen	7
2.1 Schaffung von Führungsflächen auf hydraulisch gebundenem Beton	7
2.2 Systematisierung	7
2.3 Stand der Technik	11
2.4 Anforderungen an die Führungsfläche	14
2.5 Abformlehren	17
2.5.1 Glas	18
2.5.2 Naturhartgestein	19
3 Abformmasse	21
3.1 Grundlagen hydraulisch gebundenen Betons	21
3.2 Selbstverdichtender Beton	22
3.3 Materialprüfung	23
3.4 Materialeigenschaften	26
3.4.1 Mechanische Eigenschaften	26
3.4.2 Thermische Eigenschaften	27
3.4.3 Schwinden	28
3.4.4 Kriechen	32
3.5 Fazit	33
4 Oberflächenanalyse	35
4.1 Beschreibung der Messaufgabe	35
4.2 Messgerät	35
4.3 Taststrecke	37
4.4 Messergebnis der Abformlehren	39
5 Experimentelle Untersuchungen	41
5.1 Versuchsplanung und -durchführung	41

5.2	Zugversuche	44
5.3	Auswertung der Messergebnisse zum Haftverbund	46
5.3.1	Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)	46
5.3.2	Auftragen der Trennmittel auf die Abformlehren	47
5.3.3	Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)	50
5.4	Oberflächenanalyse der abgeformten SVB-Oberflächen	50
5.4.1	Verwertbarkeit der Oberflächenkennwerte	51
5.4.2	Beurteilen der SVB-Oberflächen - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)	53
5.4.3	Auswertung der Messergebnisse - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)	55
5.4.4	Nachbearbeitung - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) .	59
5.4.5	Fazit - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)	64
5.4.6	Beurteilen der SVB-Oberflächen - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)	65
5.4.7	Auswertung der Messergebnisse - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)	67
5.4.8	Fazit - Versuchsreihe Abformlehre SVB (mit Trennmittel)	72
5.5	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen	74
6	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	LXXXIII
	Anhang	XCII
A	Patentrecherche	XCIII
B	Prüfpläne Materialeigenschaften	XCVII
C	Messwerte Oberflächenanalyse	CXI
D	Technische Daten	CXIX
E	Literaturstellen	CXXIII

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
BSG	Borosilicatglas	
DIN	Deutsches Institut für Normung	
Gabbro	Gabbro ' <i>Nero Impala</i> '	
HGB	hydraulisch gebundener Beton	
KNG	Kalk-Natron-Glas	
MPG	Mess- bzw. Positionergerät	
SVB	Selbstverdichtender Beton	
ZMN	Zentrum für Mikro- und Nanotechnologie	

1 Einleitung

1.1 Einordnung des Themas

In der modernen Fertigung steigt der Anspruch an die Präzision von Mess- und Positioniergeräten (MPG) stetig. Durch die ständige Weiterentwicklung von Antriebsstrukturen können Bahngenauigkeiten kleiner als $\pm 1 \mu\text{m}$ erreicht werden. Damit die Vorteile dieser Positioniersysteme in der Präzisionsbearbeitung und Präzisionsmesstechnik zum Tragen kommen, werden auch hohe Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Führungssysteme gestellt. [Don06, Bar82]



(a)



(b)

Abbildung 1.1: (a) Planares Positioniersystem (PPS200) und (b) Läufercke des PPS200 der Firma TETRA GmbH, entnommen aus [TET09a, TET09b]

Um Positioniergenauigkeiten von wenigen Mikrometer in MPG zu beherrschen, werden überwiegend aerostatische Führungen (siehe Abbildung 1.1(a)), auch Luftführung genannt, eingesetzt. Aerostatische Führungen zeichnen sich aus durch:

- Reibungsarmut
- geringe Wärme- und Geräuscentwicklung
- Verschleißfreiheit
- Laufruhe
- hohe Wiederholgenauigkeit

Das Luftlagerelement (siehe Abbildung 1.1(b)) wird mit einem Gas (Speisedruck p_s) gespeist, welches zwischen dem Luftlagerelement und der Führungsfläche einen engen Schmierfilm der Höhe h bildet. Durch Variation des Schmierfilmhöhe h bei konstanten Speisedruck p_s kann die Tragfähigkeit und die Steifigkeit des Luftlagerelementes verändert werden (siehe

Abbildung 1.2). Diese können je nach Ausführung Tragfähigkeiten von $20\ldots 30 \text{ N/m}^2$ erreichen. [Bar82, Don06, Sch07, Kra93]

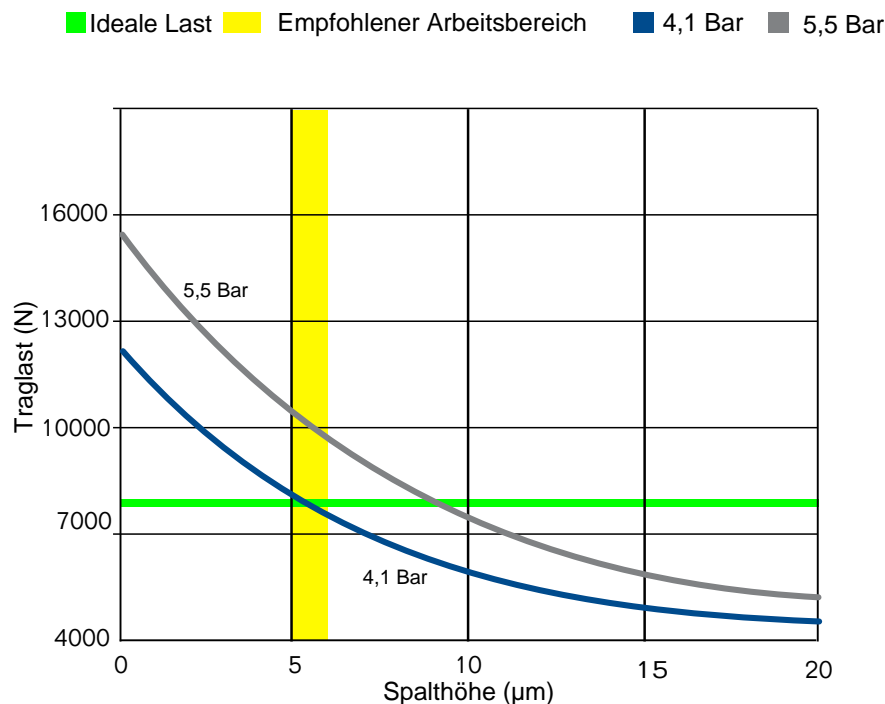


Abbildung 1.2: Abhängigkeit der Spalthöhe h von der Belastung und dem Speisedruck p_s eines Luftlageres mit Durchmesser 200 mm, entnommen aus [New09b]

Um die geforderten Positioniergenauigkeit der aerostatischen Führung zu gewährleisten, müssen die eingesetzten Grundgestelle ebenfalls betrachtet werden. Grundgestelle sind die stützenden und tragenden Elemente von MPG. Die Führungsflächen für aerostatische Führungen sind fest mit dem Gestell verbunden. Entweder als gesondertes Element oder in das Gestell als integrierte Fläche (siehe Abbildung 1.3). Variante zwei wird bevorzugt, um eine Verformung der Führungsflächen durch wechselnde Belastungen zu vermeiden. [Kra93, Tön95, WB06, Mil95]

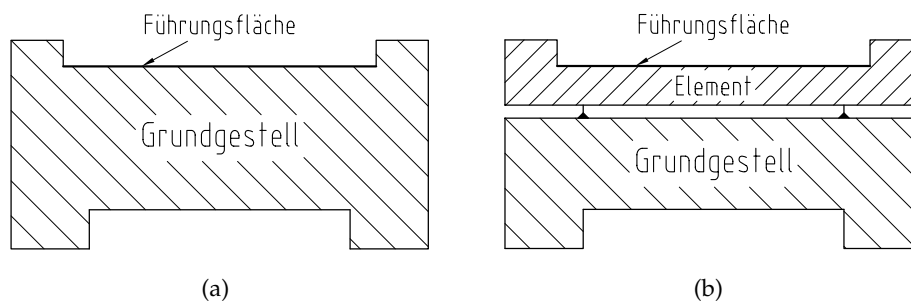


Abbildung 1.3: (a) Grundgestell mit integrierten Führungsflächen und (b) Grundgestell mit gesondertem Element für Führungsflächen

Als Gestellwerkstoff für MPG wird überwiegend Naturhartgestein eingesetzt. Auf Naturhartgestein können Führungsflächen durch subtraktive Verfahren (Läppen, Schleifen, Polieren) mit einer Ebenheit von $\pm 1 \mu\text{m}$ auf einer Länge bis hin zu 8 m gefertigt werden [Rei09b]. Dafür wird zumeist der aus Südafrika stammende Gabbro genutzt. Es handelt sich dabei um grobkristalline, magmatische Tiefengesteine, bestehend aus Quarz, Feldspat und Glimmer. [OEL09, Tho09, Rei09a]

Tabelle 1.1: Vergleich der Materialeigenschaften verschiedener Gestellwerkstoffe

Eigenschaft	Quelle	Druckfestigkeit β_D	Biegefestigkeit β_{Bz}	E-Modul β_E	Poissonzahl ν	Dichte	therm. Ausdehnungskoeff. α	spez. Wärmekapazität C
Einheit		N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	-	g/cm ³	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	kJ/kg·K
Gabbro	[OEL09b, Rei09a]	<250	10-25	60-90	-	2,8-2,9	5-7	0,845
Mineralguss	[Jac02]	140-160	15-50	30-50	0,2	2,2-2,4	9-18	0,7-1,3
GG-30	[Eis09]	960	390	108-137	0,26	7,2	10-13	0,46
ST37	TU 09b, Jac02]	250-1200	150-600	210	0,28	7,85	12	0,46-0,48
Aluminium	[WB06, TU 09a]	90-530	-	70	0,30	2,6-2,8	21-23	0,88-0,92

Metallische Werkstoffe, wie z. B. Stahl, GG¹, GGG² und Aluminium sind aufgrund ihrer schlechten thermischen Eigenschaften nicht als Gestellwerkstoff für aerostatische Führungen geeignet (siehe Tabelle 1.1). Hinzu kommt, dass für die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen viel Energie benötigt wird. Gabbro hat als Gestellwerkstoff den Nachteil, dass die kurzfristige Verfügbarkeit für die notwendige Qualität in den erforderlichen Abmessungen aufgrund der geografischen Lage der Fundorte nicht gegeben ist. Vom gebrochenen Rohstein bis zum fertigen Gestellbauteil wird ein komplexes Logistiksystem benötigt, das mit hohen Beschaffungs- und Herstellungskosten verbunden ist.

Eine Alternative zu den aufgeführten Gestellwerkstoffen stellt hydraulisch gebundener Beton. Hydraulisch gebundener Beton (HGB) wird durch das Urformverfahren Gießen hergestellt. Im Vergleich zu den Gestellwerkstoffen aus Tabelle 1.1) können mit HGB komplexe geometrische Gestelle preiswerter gefertigt werden. Ein weiterer Vorteil im Hinblick auf die Eignung als Gestellwerkstoff liegt darin, dass die Materialeigenschaften von HGB und Gabbro ähnlich sind. Vorangegangene Untersuchungen sprachen für HGB als Gestellwerkstoff, jedoch waren die durchgeführten Untersuchungen im Umfang und Fokus begrenzt [Ber09].

¹Gusseisen mit Lamellengraphit

²Gusseisen mit Kugelgraphit

1.2 Präzisierung der Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Untersuchungen zu abgeformten HGB-Oberflächen im Hinblick auf die Eignung für aerostatische Führungen durchzuführen. Das Hauptaugenmerk liegt hier in der Beurteilung der Abformgenauigkeit zwischen den HGB und der eingesetzten Abformlehre sowie den messtechnisch erfassten Gestaltabweichungen der HGB-Oberfläche.

Zuerst soll geprüft werden, ob HGB als Gestellwerkstoff für MPG geeignet ist. Der Fokus liegt hierbei in der Messung der thermischen und mechanischen Eigenschaften sowie des Schwindens. Als Abformlehren werden in dieser Arbeit ein Naturhartgestein (Gabbro) und zwei Glasarten (Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas) eingesetzt. Die Oberflächen der Abformlehren werden vor dem Betonieren hinsichtlich ihrer Gestaltabweichungen untersucht. Im Mittelpunkt steht die messtechnische Untersuchung der Formabweichung (Ebenheit) und der Rauheit. Anhand von Vergleichsmessungen mit den abgeformten HGB-Oberflächen können Aussagen über die erzielte Abformgenauigkeit getroffen werden.

Aufbauend auf einer Abformmasse (HGB), der Auswahl geeigneter Abformlehren und der Systematisierung möglicher Verfahrensvarianten werden die Probekörper für die Untersuchungen betoniert. Die maximalen Abmessungen der Probekörper betragen ($B \times H \times T$) $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, welche durch die zum Einsatz kommenden Schalungen definiert werden. Aus den messtechnisch erfassten Gestaltabweichungen der HGB-Oberflächen werden anschließend Aussagen über den Einsatz von HGB als Grundgestell mit Führungsflächen für aerostatische Führungen abgeleitet.

1.3 Abgrenzung der Thematik

Das Ziel dieser Arbeit ist es nicht, durch das Verfahren *direktes Abformen* hydraulisch gebundene Betonoberflächen zu schaffen, auf denen aerostatische Führungen eingesetzt werden können. Schwerpunkt dieser Arbeit sind vielmehr Grundlagenuntersuchungen zur Abformgenauigkeit zwischen den eingesetzten Abformlehren und dem verwendeten hydraulisch gebundenen Beton. Aus diesem Grund werden für die jeweiligen Untersuchungen nur drei Probekörper pro Versuch herangezogen. Die erzielten Ergebnisse sollen nicht statistisch abgesichert, sondern ausschließlich miteinander verglichen und bewertet werden.

Die erzielte Abformgenauigkeit wird durch den Vergleich der Gestaltabweichungen auf der Oberfläche der Abformlehre und der abgeformten HGB-Oberfläche bewertet. Dazu werden vor und nach den Untersuchungen die Gestaltabweichungen messtechnisch erfasst. Von Bedeutung ist insbesondere die Messung der Rauheit R_a und R_z . Aufgrund des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit ist eine messtechnische Erfassung der Ebenheit nicht möglich. Aussagen über die Ebenheit der abgeformten HGB-Oberflächen ($A \geq 100 \text{ mm}^2$) können getroffen werden, sind aber mit Vorbehalt, wegen der relativ kleinen Fläche, zu betrachten.

Als Abformmaterialien werden Kalk-Natron-Glas, Borosilicatglas und Naturhartgestein (Gabbro) betrachtet. Weitere Abformmaterialien können aufgrund des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit nicht untersucht werden. Als Abformmasse wird in dieser Arbeit nur ein hydraulisch gebundener Beton betrachtet (SVB). Die Technologien und Hintergründe für die Herstellung von selbstverdichtenden Beton (kurz: SVB) sollen nur soweit betrachtet werden, wie es für das Verständnis der charakteristischen Merkmale erforderlich ist. Auch das Mischungsverhältnis der Komponenten des verwendeten SVB wird nicht Bestandteil dieser Arbeit sein.

2 Allgemeine Grundlagen

In diesem Kapitel werden zu Beginn die Möglichkeiten zur Schaffung von Luftführungsflächen auf hydraulisch gebundenem Beton systematisiert. Im Anschluss der Systematisierung werden die einzelnen Verfahren charakterisiert und auf die Besonderheiten des *direkten Abformens* hingewiesen. Im Anschluss werden die Forderungen an die Führungsflächen für den Einsatz von aerostatischen Führungen und die daraus resultierenden Gestaltabweichungen der abgeformten HGB-Oberfläche formuliert. Aufbauend auf den geforderten Gestaltabweichungen sowie dem Vergleich der Vor- und Nachteile für das Betonieren mit HGB, werden die Abformlehren für das *direkte Abformen* ausgewählt.

2.1 Schaffung von Führungsflächen auf hydraulisch gebundenem Beton

Ebene Führungsflächen für aerostatische Führungen können durch die Verfahren¹ *Einbetten* und *Abformen* hergestellt werden. Durch das Verfahren *Abformen* werden die Führungsflächen direkt auf den HGB mittels des Urformverfahrens Gießen hergestellt. Die Formgebung der HGB-Oberfläche erfolgt *direkt* durch eine Abformlehre oder *nachträglich* mittels einer Abformlehre und einer Masse². Beim *Einbetten* wird die Führungsfläche durch die Integration von ebenen Einlegeteilen in das HGB-Grundgestell realisiert. Ziel dieser Verfahren ist es, eine spanende Nachbearbeitung der HGB-Oberfläche für den Einsatz als Luftführungsfläche für aerostatische Führungen zu vermeiden.

2.2 Systematisierung

Abbildung 2.1 zeigt die einzelnen Verfahrensvarianten sowie die Anforderungen an den Haftverbund zwischen den Elementen (Abformlehre / Einlegeteil) und HGB (Abformmasse / Masse).

¹Geplanter, nachvollziehbarer und wiederholbarer Ablauf, welcher in einzelne Schritte zerlegbar ist

²Als Masse kann beispielsweise HGB oder Polymerbeton verwendet werden

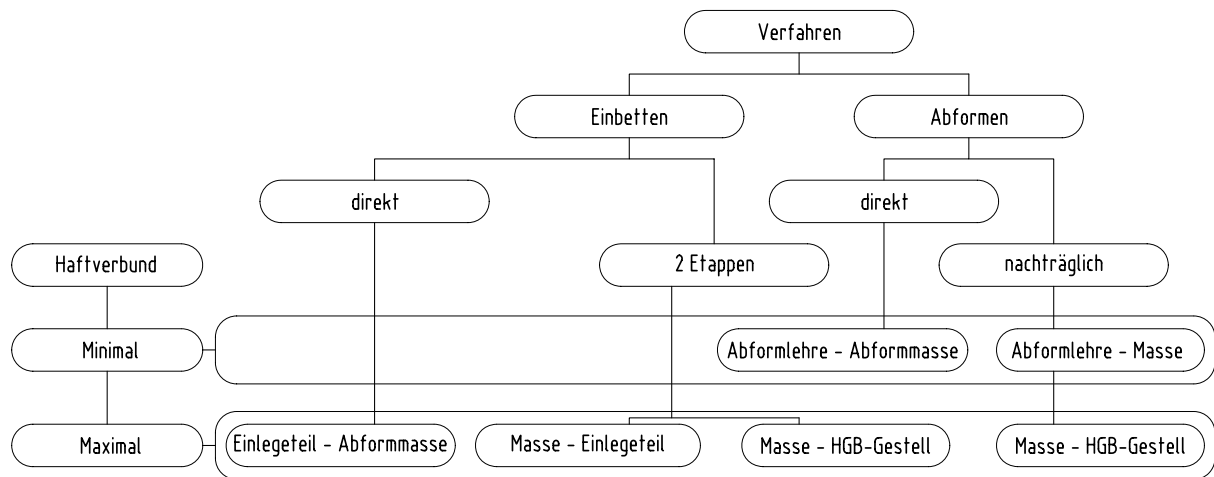


Abbildung 2.1: Übersicht der Verfahrensvarianten *Abformen* und *Einbetten* zur Schaffung von präzisen Führungsflächen auf einem hydraulisch gebundenem Betongestell

Einbetten

Beim Verfahren *Einbetten* wird zwischen dem *direkten Einbetten* und dem *2 Etappen Einbetten* unterschieden. Das *Einbetten* basiert auf dem Prinzip Funktionswerkstoff an Funktionsstelle. Der Funktionswerkstoff ist funktionell oder aus technologischer Sicht gesehen gegenüber dem eingesetzten HGB zu bevorzugen. Dieser besitzt besserer thermische und mechanische Eigenschaften als der eingesetzte HGB. Beim *Einbetten* wird ein Element, was als ebene Führungsfläche fungiert, mit dem HGB-Gestell fest verbunden.

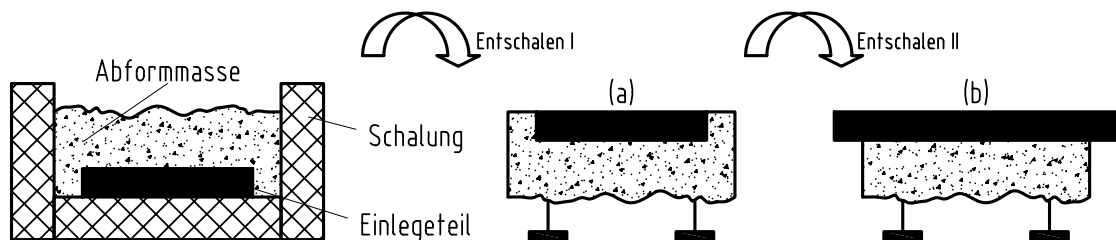


Abbildung 2.2: Prinzipdarstellung des *direktes Einbetten* mit Einlegeteil, welches (a) komplett eingebettet wird oder (b) über den Rand des HGB-Gestells hinausragt

Im Fall des *direkten Einbettens* wird das *Einlegeteil* beim Gießen mit in das HGB-Gestell integriert (siehe Abbildung 2.2). Hierzu muss sichergestellt werden, dass zwischen den beiden Elementen ein dauerhafter Haftverbund entsteht. Dies kann durch Adhäsion oder Formschluss zwischen der *Abformmasse* und dem *Einlegeteil* erreicht werden. Das *Einlegeteil* kann wie im Fall (a) komplett *eingebettet* werden, oder wie im Fall (b) über den Rand des HGB-Gestells hinausragen.

Im Falle des *2 Etappen Einbettens* wird das Einlegeteil mit Hilfe einer Zwischenschicht (Masse) mit dem HGB-Gestell stoffschlüssig verbunden (siehe Abbildung 2.3). Unter dem *2 Etappen Einbetten* kann auch das Fertigungsverfahren *Kleben* verstanden werden. Durch *Kleben* wird das Einlegeteil mittels Klebstoff stoffschlüssig verbunden.

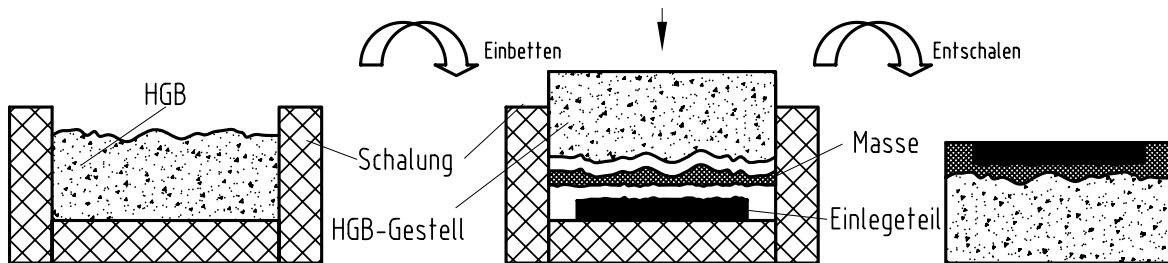


Abbildung 2.3: Prinzipdarstellung des *2 Etappen Einbetten*

Abformen

Bei diesem Verfahren wird in *direkt* und *nachträglich* unterschieden. Ausgangspunkt für das *nachträgliche Abformen* ist ein fertig gegossenes HGB-Gestell. Die Führungsfläche wird mittels einer Abformlehre und Masse auf dieses aufgetragen. Hierzu wird die Geometrie der Abformlehre unter dem Einsatz einer Abformmasse auf dem HGB-Gestell abgebildet (siehe Abbildung 2.4).

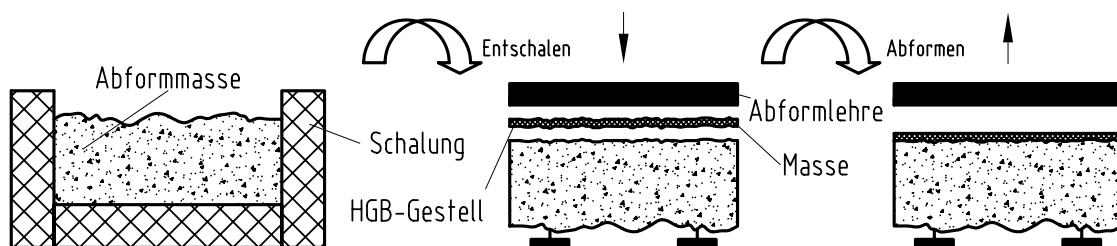
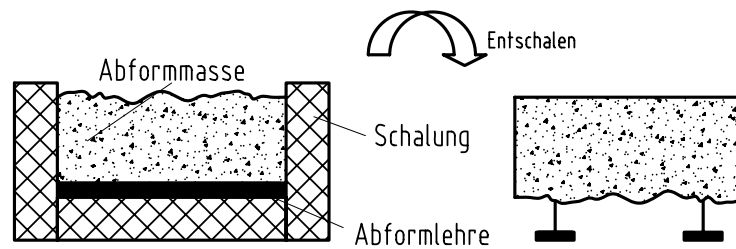


Abbildung 2.4: Prinzipdarstellung des *nachträglichen Abformens*

Die geforderte Ebenheit der Führungsfläche wird durch die Abformlehre definiert. Die Schwierigkeit dieses Verfahrens besteht darin, einen dauerhaften Haftverbund zwischen HGB-Gestell und Abformmasse und dabei einen geringen Haftverbund zwischen Abformlehre und Masse zu realisieren.

Beim *direkten Abformen* wird der HGB als Abformmasse auf eine Abformlehre gegossen mit dem Bestreben, dass der HGB die Oberfläche der Abformlehre abbildet. Die geforderte Ebenheit der HGB-Oberfläche wird ebenfalls durch die zum Einsatz kommende Abformlehre realisiert (siehe Abbildung 2.5). Hierzu wird die Abformlehre vor dem Betonieren in die vorgesehene Schalung eingelegt³, mit der flüssigen Abformmasse befüllt und nach dem Erhärten wieder voneinander getrennt.

³Die Abformlehre kann auch Teil der Schalung sein

Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung des *direkten Abformens*

Im Fokus des *direkten Abformens* steht die Fertigung eines HGB-Gestells mit Führungsflächen in einem Arbeitsschritt. Tabelle 2.1 zeigt die Vor- und Nachteile der möglichen Verfahrensvarianten im Vergleich.

Tabelle 2.1: Vergleich der Vor- und Nachteile der Verfahren *Einbetten* und *Abformen*

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Einbetten		
<i>direkt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Grundgestell mit Führungsflächen in einem Arbeitsschritt - Variation der Einlegeteile - Ebenheit und Rauheit wird über Einlegeteil definiert - Funktionswerkstoff an Funktionsstelle 	<ul style="list-style-type: none"> - auflösen des Haftverbundes aufgrund des Schwinden von HGB - Kosten für Einlegeteil
<i>nachträglich</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Ebenheit und Rauheit über Einlegeteil definiert 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten für Einlegeteil und Masse - mehrere Arbeitsschritte notwendig
Abformen		
<i>direkt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Grundgestell mit Führungsflächen in einem Arbeitsschritt - Formgebung der HGB-Oberfläche über Abformlehre - Wiederverwendung der Abformlehre - keine Zusatzkosten für Masse und Einlegeteile - einmalige Kosten für die Abformlehre 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwinden der HGB-Oberfläche → negative Beeinflussung der Ebenheit
<i>nachträglich</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Formgebung der HGB-Oberfläche über Abformlehre - Wiederverwendung der Abformlehre 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten für Masse - mehrere Arbeitsschritte notwendig

Mit dem *direkten Abformen* sollen HGB-Gestelle mit Führungsflächen für aerostatische Führungen in einem Fertigungsschritt geschaffen werden, das heißt ohne spanende Nachbearbeitung der abgeformten HGB-Oberfläche. Lediglich eine Beschichtung des HGB-Gestells mit einem Oberflächenschutzsystem ist vorgesehen. Die HGB-Oberfläche ist offenporig womit Wasser oder Schadstoffe über die Mikroporen eindiffundieren können und die Bewehrung sowie die Zementmatrix zersetzen [Wes93]. Die Beschichtung darf die Oberflächenebenheit und -rauheit nicht negativ beeinflussen.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Gestaltabweichungen der Führungsflächen in beiden Verfahren durch die Abformlehre bzw. das Einlegeteil bestimmt und auch maximal nur so gut werden können. Aus diesem Grund werden Werkstoffe eingesetzt, welche die geforderten Gestaltabweichungen aufweisen bzw. durch Nachbearbeitung erhalten.

2.3 Stand der Technik

Technologien

Im Bereich des Maschinenbaus wurden zu Beginn des 19. Jahrhunderts die ersten Versuche unternommen, den bis dahin gebräuchlichen Gestellwerkstoff Gusseisen durch Beton zu ersetzen [Jac02]. Gestelle mit Führungsflächen aus Beton konnten sich aufgrund des hohen Verschleißes nicht durchsetzen. Mit der Entwicklung von Reaktionsharzsystemen in den 70er Jahren war es möglich, polymergebundenen Mineralguss⁴ herzustellen. Untersuchungen zur Eignung von Mineralguss als Gestellwerkstoff zeigten, dass Führungsflächen auf Maschinengestellen mit den geforderten Gestaltabweichungen gefertigt werden konnten. [Utz09, Jac02]

Beim Urformverfahren Gießen von Mineralguss können die geforderten Gestaltabweichungen für den Einsatz von aerostatischen Führungen nicht erreicht werden. Hierzu sind nachträgliche Bearbeitungsschritte notwendig. Im nachfolgenden sind die bisher angewendeten Nachbearbeitungsvarianten aufgelistet [Jac02]:

- Bearbeitung von Eingießteilen
- Bearbeitung von Mineralguss
- nachträgliches Abformen

Auf dem Prinzip der mechanischen Nachbearbeitung basieren die beiden erstgenannten Verfahren. Die eingegossenen Teile (häufig Stahl oder Gussteile) und der Mineralguss selbst, werden mit den für das jeweilige Material üblichen Bearbeitungsverfahren nachbearbeitet.

⁴Unter dem Begriff Mineralguss wird ein Bauteil mit definierter Gestalt verstanden. Reaktionsharzbeton (kurz: RHB) ist die Bezeichnung für den formlosen Werkstoff

Patentrecherche

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Patentrecherche mit Hilfe des *Patentinformationszentrums und Online-Dienste (PATON)* der *Technischen Universität Ilmenau* zu den Verfahrensvarianten *Abformen* und *Einbetten* durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit beim *direkten Abformen* liegt.

Das Ziel dieser Recherche war es, Patente ausfindig zu machen, in denen Fertigungsprozesse zur Schaffung von Führungsflächen für aerostatische Führungen geschützt sind. Weiterhin lag das Hauptaugenmerk darauf, herauszufinden, inwiefern der in dieser Arbeit eingesetzte HGB, selbstverdichtender Beton, als Abformmasse geschützt war bzw. ist. Die in der Patentrecherche gefundenen Patente zum *direkten Abformen* sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Die zusätzlich zum Verfahren *Einbetten* gefundenen Patente sind im Anhang A dargestellt.

Problematisch an der Patentrecherche zu dieser Thematik war die subjektive Beurteilung der erschaffenen HGB-Oberfläche in den Patentschriften. Es sollen Führungsflächen für aerostatische Führungen geschaffen werden, wodurch die HGB-Oberfläche festgelegte Werte für Ebenheit, Welligkeit und Rauheit aufweisen muss. Das heißt, Erläuterungen zu den abgeformten Flächen wie „geringe Rauheit“ oder „eben“ sind nicht aussagekräftig. Aus diesem Grund war die Relevanz der Patente in Bezug zu dieser Thematik nicht erkennbar.

In der vom *PATON* durchgeführten Patentrecherche wurden insgesamt 33 Patente zum *Abformen* und *Einbetten* gefunden. Davon bezogen sich nur sechs auf das *Abformen*. Von diesen sechs Patentschriften besaß lediglich eine den Bezug zum *direkten Abformen*. Die *Siemens AG* (Patentschrift: DE 102 51 228 C 1) patentierte einen Maschinensockel mit Führungsflächen und dem Verfahren zu dessen Herstellung. Die Führungsflächen werden durch das *direkte Abformen* von Polymerbeton auf einer polierten Stein- oder Granitplatte (die Abformlehre) realisiert. Auch in diesem Fall soll die abgeformte Oberfläche nicht nachbearbeitet werden. Die Patentansprüche sind dadurch gekennzeichnet, dass als Abformmasse Polymerbeton und als Abformlehre eine polierte Granitplatte eingesetzt wird. In den weiteren fünf Patenten sind keine geschützten Inhalte zum *direkten Abformen* von SVB vorhanden. In der Patentschrift EP 1 923 185 A1 wird das Einfüllen von SVB in die Schalung geschützt.

Aus der durchgeführten Patentrecherche kann zusammengefasst werden, dass es zum *Abformen*, insbesondere zum *direkten Abformen* von SVB keine Patentschriften, Offenlegungsschriften oder Patentanmeldungen existieren. Es ist zwar eine Patentschrift der *Siemens AG* zum *direkten Abformen* von Polymerbeton vorhanden, jedoch ist diese aufgrund der eingesetzten Abformmasse nicht weiter relevant. In der Patentanmeldung EP 1 923 185 A1 wird das Befüllen der Schalung mit SVB mittels Druckschläuchen geschützt. Diese Tatsache weist allerdings keinen Bezug zur Thematik dieser Arbeit auf, ist jedoch für die spätere Fertigung von SVB-Gestellen mit abgeformten Führungsflächen relevant.

Tabelle 2.2: Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungs-
schriften zum *direkten Abformen* aus der Patentrecherche

Nr.	Bezeichnung	IPC	Jahr	Art	Geschützter Inhalt	Bezug zum Thema	Abweichungen vom Thema
1	EP0253930A1	B23Q0001	1986	Patentschrift	Verfahren zur Herstellung von Maschinenteilen mit präzisen Oberflächen zur Gleitlagerung durch Abformen von Beton auf Stahl oder Granit; Anschließend Schleifen der abgeformten Betonoberfläche auf Maß, oder Einbetten von Granit, Marmor und Quartz	Realisierung von Funktionsflächen durch Abformen und Einbetten von Beton; Verwendung von Granit als Form- und Abformwerkstoff	keine Angabe zur verwendeten Betonart; Möglichkeit der Nachbearbeitung der Funktionsflächen
2	DE 197 14 736 A1	B29C39/18	1998	Offenlegungsschrift	Verfahren zur Herstellung von Maschinenteilen aus kaltgehärtetem Mineralguss mit absolut luftblasenfreier Oberfläche und geringer Ebenheitsabweichung, beliebig strukturierbar durch Baukastenprinzip	Herstellung von präzisen Flächen durch Gießen von Beton in eine Holz- oder Metallschalung; Ebenheitsabweichung von 0,03mm auf einer Fläche von 500mm x 500mm	Epoxydharzschicht an den Formwänden zur Herstellung der Präzisionsoberfläche; keine Angabe zur Verwendung der Oberfläche; keine Angaben zum Einsatzzweck; keine Angabe zur Oberflächenrauheit
3	DE 102 51 228 C1	B23Q1/01	2002	Patentschrift	Maschinensockel mit Führungsflächen und Verfahren zu dessen Herstellung: direktes Abformen von Beton zur Schaffung von Führungsflächen zur Gleitlagerung von beweglichen Maschinenteilen	Führungsflächen durch unmittelbar abgeformte Oberflächen des Polymerbetons ohne Nachbearbeitung geschaffen; Führungsflächen für Luftlager ohne Nachbearbeitung; Abformlehre: polierte Stein-/Granitplatte	Verwendung von Polymerbeton; keine Zahlenwertangabe von Rauheit bzw. Ebenheit der Oberfläche
4	DE 103 00 754 A1	E01C 5/00	2004	Offenlegungsschrift	einschichtiger Formstein aus SVB mit einer Oberfläche geringer Rauigkeit	Verwendung einer einzigen Schicht aus SVB; äußere Form beliebig gestaltbar; Oberfläche hat geringe Rauigkeit; wasserdichte Schalung aus Holz, Kunststoff oder Metall	Luftporen an der Oberfläche; keine Anwendung im Maschinenbau genannt; Keine Wertangaben der Rauheit, Ebenheit benannt; keine Angabe zur Herstellung der Oberfläche benannt
5	EP 1 923 185 A1	B28B7/22	2006	Patentanmeldung	Verfahren zur Fertigung eines einstückigen Fertigteils aus SVB, wobei der SVB mittels Druckschläuchen von unten in die Schalung eingepresst wird	Herstellung eines Fertigteils aus SVB	keine Angaben über die zu betonierenden Fertigteile; keine Schaffung von Präzisionsflächen durch direktes Abformen; keine Integration von Funktionslementen
6	WO2009037112A3	B23Q0001	2007	Patentschrift	Werkzeugmaschinengestell aus hochfestem bzw. ultrahochfesten Beton mit Führungselementen zur beweglichen Lagerung des Gestells	Betongestell mit Führungselementen	keine Angabe zur Herstellung des Gestells; keine Angabe zur Realisierung der Führungselemente; Verwendung von ultrahochfesten Beton mit Fasern; Führungsflächen werden nicht direkt abgeformt

2.4 Anforderungen an die Führungsfläche

Das Luftlagerelement einer aerostatischen Führung bildet mit der parallel gegenüberliegenden Führungsfläche einen engen Luftspalt, durch das Gas durchströmt und einen tragfähigen Schmierfilm bildet. Der Schmierfilm hat je nach Anwendungsfall eine Höhe h (Spalthöhe) zwischen 5 und 15 μm [Kra93, Bar82]. Aufgrund der Kompressibilität der Luft neigen aerostatische Führungen zu selbsterregten Schwingungen, die durch eine ausreichende Stabilität des Luftlagerelementes vermieden werden kann. Um ein stabiles Luftlagerelement zu gewährleisten, spielt dessen Steifigkeit eine wichtige Rolle [New09e]. Je größer die Spalthöhe h ist, desto kompressibler ist diese. Für eine optimale Steifigkeit sind kleine Spalthöhen notwendig. Eine Spalthöhe h von ca. 5 μm hat sich als guter Kompromiss erwiesen (siehe Abbildung 1.2). Bei einer Spalthöhe h von wenigen Mikrometern steigt die Gefahr einer Kollision des Luftlagerelementes mit der Führungsfläche. Um dies zu vermeiden, müssen die Führungsflächen des Gestells konstruktive Forderungen erfüllen [New09e, Kra93, Bar82]:

- Nach KRAUSE [Kra93] und BARTZ [Bar82] sollte die Ebenheit der Führungsfläche des Grungestells drei bis viermal kleiner als die Höhe h des Schmierfilms sein. Weiterhin sollte die gemittelte Rautiefe R_z der Führungsfläche maximal ein Drittel der Schmierfilmhöhe h betragen.
- Gemäß [New09c] sollte die Ebenheit der Führungsfläche 50 % der Schmierfilmhöhe h sein. Im Gegensatz zu KRAUSE fordert NEW WAY AIR BEARINGS einen Mittenrauhwert R_a der Führungsfläche mit kleiner als 0,4 μm .

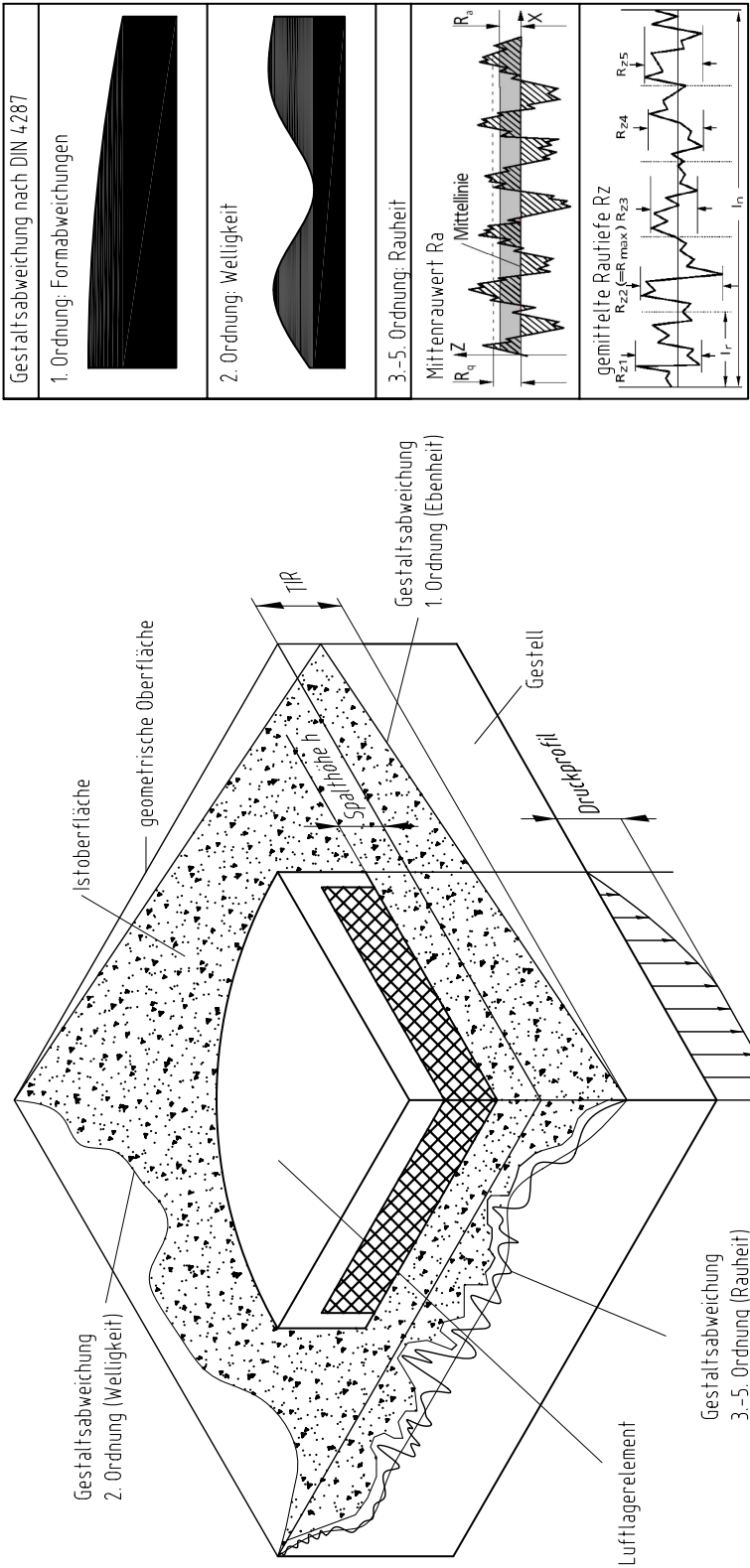
Zusammenfassung der zulässigen Gestaltabweichungen für Führungsflächen

Nach Deutscher Industrienorm 4760 [DIN 4760] wird unter der Gestaltabweichung die Gesamtheit aller Abweichungen der *Istoberfläche* von der *geometrischen Oberfläche* verstanden. Unter der *Istoberfläche* wird das messtechnisch erfasste, angenäherte Abbild der wirklichen Oberfläche eines Formelementes verstanden. Verschiedene Messverfahren⁵ (z. B. optisch oder taktil) ergeben verschiedene *Istoberflächen* des selben Formelement. Die *geometrische Oberfläche* ist die ideale Oberfläche, deren Nennform durch technischen Zeichnungen definiert wird.

Gestaltabweichungen einer technischen Oberfläche können in sechs Ordnungen unterschieden werden. Um Aussagen über die Abformgenauigkeit treffen zu können, müssen die Gestaltabweichungen 1., 2. und 3.-5. *Ordnung* messtechnisch erfasst werden (siehe Abbildung 2.6). Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Arbeit kann die Abformgenauigkeit nur anhand der Gestaltabweichungen 3.-5. *Ordnung* beurteilt werden. Im Vordergrund steht die Messung des Mittenrauhwert R_a und der gemittelten Rautiefe R_z .

⁵Unter einem Messverfahren wird die praktische Anwendung eines Messprinzips (Physikalische Grundlage der Messung z. B. die Interferenz des Lichtes als Grundlage einer Längenmessung) und einer Messmethode verstanden [DIN 1319-1].

Abbildung 2.6: Gestaltabweichungen 1., 2. und 3.-5. Ordnung nach DIN 4760 einer Führungsfläche mit Luftlagerelement



Formabweichungen (1. *Ordnung*) sind über die gesamte *Istoherfläche* eines Formelementes feststellbar. Die Unebenheit der Führungsfläche (z. B. aufgrund der Durchbiegung des Gestells oder der Abformlehre beim Gießen) bewirken eine Abweichung der aerostatischen Führung von ihrer idealen Geradlinigkeit [Kra93]. Gestaltabweichungen 2. *Ordnung* (Welligkeit) sind periodisch auftretende Abweichungen bei denen das Verhältnis der Wellenabstände zu Wellentiefe zwischen 1000:1 und 100:1 liegt. Eine wellige Führungsfläche führt dazu, dass es unterhalb des Luftlagerelementes zu geänderten Abströmverhältnissen der Luft aus dem Luftspalt kommt. Dies kann dazu führen, dass das Luftlagerelement stärker zu selbsterregten Schwingungen neigt [Kra93]. Unter Gestaltabweichungen 3.-5. *Ordnung* (Rauheit) werden wiederkehrende Abweichungen von der *Istoherfläche* des Formelementes verstanden. Das Verhältnis der Abstände zur Tiefe liegt im allgemeinen zwischen 100:1 und 5:1. Gestaltabweichungen 6. *Ordnung* sind die durch den Aufbau der Materie bedingten Abweichungen. [DIN 4760]

Anhand der konstruktiven Forderungen (siehe Abschnitt 2.4) ergeben sich für die Führungsfläche für aerostatische Führungen folgende Gestaltabweichungen:

- Ebenheit: 2 bis 4 μm
- gemittelte Rautiefe R_z : 1,5 bis 5 μm , oder
- Mittenrauwert R_a : < 0,4 μm

Die Kennwerte für die gemittelte Rautiefe R_z und den Mittenrauwert R_a können auch größere Dimensionen annehmen, solange die Abweichungen von den geforderten Kennwerten durch Täler in der Luftführungsfläche bestimmt werden. Die auf der Luftführungsfläche befindlichen Spitzen, welche höher als der Luftspalt h sind, können das Luftlagerelement beschädigen und dessen Funktionalität beeinträchtigen. Täler in der Luftführungsfläche sind für das Luftlagerelement nicht kritisch.

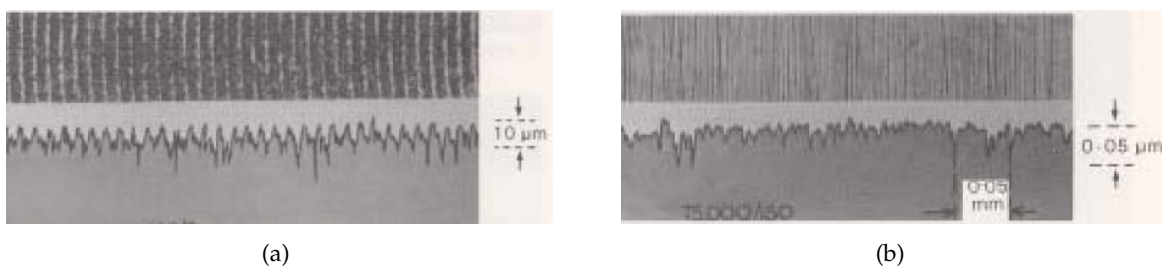


Abbildung 2.7: (a) Stirngefräste Oberfläche mit Spitzen und Tälern und (b) geläppte Oberfläche mit Tälern, entnommen aus [Pet09]

In dieser Arbeit werden nur die Gestaltabweichungen 3.-5. *Ordnung* betrachtet und für die Beurteilung der Abformgenauigkeit zwischen HGB-Oberfläche und Abformlehre herangezogen. Das Hauptaugenmerk liegt in der messtechnischen Erfassung des Mittenrauwerths R_a und der gemittelten Rautiefe R_z .

2.5 Abformlehren

Das Ziel des *direkten Abformens* ist es, die Oberfläche der Abformlehre durch den flüssigen HGB abzubilden. Im Idealfall werden alle Gestaltabweichungen auf der Oberfläche der Abformlehre als invers auf der HGB-Oberfläche abgeformt. Als Abformlehren werden daher nur Werkstoffe betrachtet, auf deren Oberflächen die geforderten Gestaltabweichungen durch Urformen und spanende Bearbeitung geschaffen werden können. Folgende Werkstoffgruppen werden hierzu betrachtet:

- Metalle (Gusseisen, Stahl, Aluminium)
- Nichtmetalle (Naturhartgestein)
- organische Werkstoffe (Kunststoff)
- anorganische nichtmetallische Werkstoffe (Glas)

Im Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Werkstoffe aus allen vier Werkstoffgruppe benannt (siehe Tabelle 2.3). Anhand ihrer Eigenschaften erfolgt die Beurteilung über den Einsatz als Abformlehre für das *direkte Abformen*.

Kunststoffe (*organische Werkstoffe*) scheiden in dieser Arbeit als Abformlehren aus. Diese sind aufgrund ihrer schlechten thermischen Eigenschaften und der Dickenschwankungen im Material nicht als Abformlehre verwendbar. Weiterhin sind Kunststoffe sehr weich, im Vergleich zu anderen Werkstoffen in Tabelle 2.3, wo durch eine Verformung der Oberfläche durch die Gesteinskörnung im HGB denkbar wäre. Die Werkstoffe Stahl, Aluminium, Gusseisen (*Metalle*), Naturhartgestein (*Nichtmetalle*) und Glas (*anorganische nichtmetallische Werkstoffe*) sind aufgrund ihrer Oberflächenkennwerte (hohe Ebenheit, geringe Rauheit) als Abformlehren geeignet. Auf den Metallen und dem Naturhartgestein müssen die geforderten Gestaltabweichungen der Oberfläche durch subtraktive Verfahren (Läppen, Schleifen, Polieren) geschaffen werden. Beim Glas sind die geforderten Oberflächenkennwerte durch das Urformverfahren (Floatverfahren) gegeben.

Neben den geforderten Gestaltabweichungen der Oberfläche spielt die Steifigkeit des Werkstoffes für den Einsatz als Abformlehre eine entscheidende Rolle. Hierzu wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Entweder bringt der Werkstoff die erforderliche Steifigkeit selber auf oder der Werkstoff ist sehr flexibel und ein Support (als Unterlage) bringt die erforderliche Steifigkeit auf. Für den ersten Fall ist ein hohes Elastizitätsmodul sowie eine hohe Materialstärke notwendig. Für diesen Fall kommen nur die Werkstoffe Stahl, Gusseisen, Aluminium (*Metalle*) und Naturhartgestein (*Nichtmetalle*) in Frage. Bei Glas (*anorganisch nichtmetallische Werkstoffe*) ist die Materialdicke durch das Herstellungsverfahren begrenzt. Außerdem steigen im Glas die inneren Spannungen mit steigender Materialdicke, was schließlich zum Bruch führen kann. Auf der anderen Seite ist Glas in einer geringen Materialstärke sehr flexibel und kann in diesem Fall auf einen Support gelegt werden, der die benötigte Steifigkeit aufweist.

Tabelle 2.3: Vergleich der Vor- und Nachteile von Werkstoffen aus den vier Werkstoffgruppen für die Eignung als Abformlehre für das *direkte Abformen*

Werkstoff	Vorteile	Nachteile
Gusseisen, Stahl, Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Steifigkeit - beliebige Materialdicke wählbar - hohe Ebenheit - geringe Rauheit - hartes Material 	<ul style="list-style-type: none"> - thermische Eigenschaften - Korrosion durch Wasser im Beton - geforderten Oberflächenparameter der Oberfläche werden durch spanende Bearbeitung geschaffen - Wärmeeintrag in das Material durch Bearbeitung
Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Rauheit durch Urformverfahren gegeben - beliebige Materialdicke wählbar 	<ul style="list-style-type: none"> - thermische Eigenschaften - geringe Steifigkeit - weiches Material - Dickenschwankungen im Material - Verformung der Oberfläche durch Gesteinskörnung
Glas	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Rauheit durch Urformverfahren gegeben - hohe Ebenheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialdicke durch Urformverfahren begrenzt - geringe Steifigkeit - thermische Eigenschaften - spröder Werkstoff
Naturhart- gestein	<ul style="list-style-type: none"> - thermische Eigenschaften - hohe Steifigkeit - beliebige Materialdicke wählbar - geringe Rauheit - hohe Ebenheit - hartes Material 	<ul style="list-style-type: none"> - geforderten Oberflächenparameter der Oberfläche werden durch spanende Bearbeitung geschaffen

Anhand der geforderten Oberflächenparameter Rauheit und Ebenheit und der Steifigkeit der Materialien können Stahl, Gusseisen, Aluminium, Glas und Naturhartgestein als Abformlehren eingesetzt werden. Problematisch beim Einsatz von *Metallen* als Abformlehre könnte die Korrosion der Oberfläche durch das Wasser im HGB sein. Aus diesem Grund werden *Metalle* in dieser Arbeit als Abformlehren nicht betrachtet.

2.5.1 Glas

In dieser Arbeit werden die Gläser Kalk-Natron-Glas (KNG) und Borosilicatglas⁶ (BSG) auf ihre Eignung als Abformlehren untersucht. Beide Glasarten werden über das Floatverfahren⁷ herge-

⁶BOROFLOAT®³³ der Firma SCHOTT TECHNICAL GLASS SOLUTIONS GMBH

⁷Beim Floatverfahren fließt geschmolzene Glas kontinuierlich mit einer Temperatur (>1000°C) über ein Zinnbad. Das geschmolzene Glas verteilt sich gleichmäßig und wird durch gezielte Beeinflussungen in die erforderliche

stellt. BSG unterscheidet sich von KNG durch das Massenverhältnis der einzelnen Komponenten sowie den Zusatzstoff Bortrioxid (B_2O_3) (siehe Abbildung 2.8).

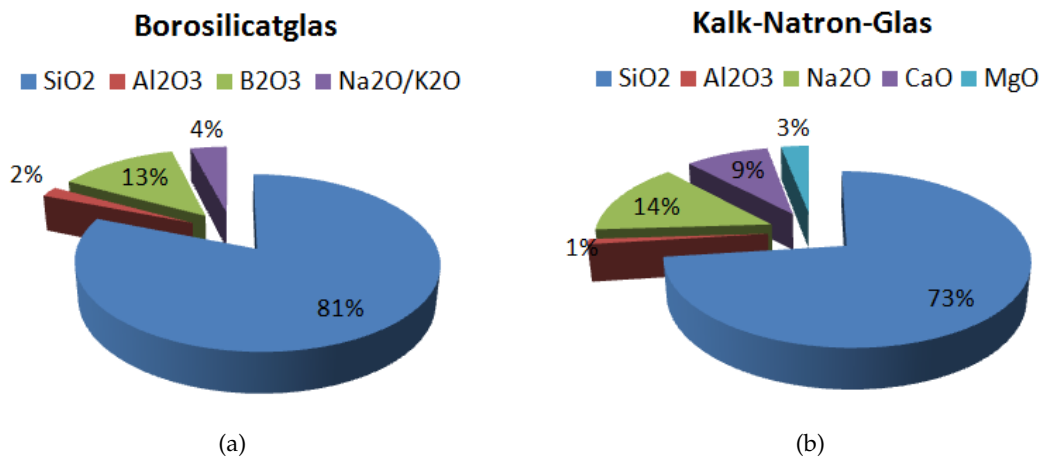


Abbildung 2.8: Vergleich der stofflichen Zusammensetzung von (a) Borosilicatglas und (b) Kalk-Natron-Glas, entnommen aus [SCH09b]

Der Grund für den Einsatz von zwei Gläsern ist durch eine mögliche Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zwischen dem Zement des Betons und dem KNG zu begründen. Unter AKR wird eine chemische Reaktion zwischen den Alkalien des Zementsteins und alkalilöslicher Kieselsäure⁸ im KNG verstanden. Dies lässt vermuten, dass durch diese chemische Reaktion ein Haftverbund zwischen beiden Werkstoffen entsteht. BSG wiederum zeichnet sich durch einen niedrigen Alkalianteil aus, wodurch ein Haftverbund ausgeschlossen werden kann [SCH09b].

2.5.2 Naturhartgestein

Gabbro „Nero Impala“ (kurz: Gabbro) gehört aufgrund seiner feinkristallinen Struktur, hohen Festigkeit und niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe Tabelle 1.1) zu den am häufigsten eingesetzten Gestellwerkstoffen für MPG [Rei09a]. Des Weiteren können auf Gabbro optimale Luftführungsflächen geschaffen werden, welche keine Spitzen, sondern nur Krater aufweisen.

Problematisch beim Einsatz von Naturhartgestein als Abformlehre könnten die Krater in dessen Oberfläche sein. Diese könnten bei einer idealen Abformung durch den HGB mit abgeformt werden, was zu einer ebenen HGB-Oberfläche mit Spitzen führen würde. Dies bedeutet, dass eine zusätzliche Nachbearbeitung der HGB-Oberfläche notwendig ist, um die Spitzen wieder zu entfernen.

Dicke gebracht. Anschließend durchläuft das „feste“ Glas einen Kühlkanal, in dem eine kontrollierte Abkühlung stattfindet. [Pil09, SCH09a]

⁸Kieselsäure (SiO_2) kommt in der Natur meist als Quarz, d.h. kristallin vor, ist sehr beständig und somit wenig reaktionsfähig. Wenn jedoch die Kristalle [...] zerstört [...] werden, ist auch Quarz reaktionsfähig. [Wes93]

3 Abformmasse

3.1 Grundlagen hydraulisch gebundenen Betons

Unter hydraulisch gebundenem Beton, kurz Beton, wird ein 3-Stoff-System aus Zement, Zuschlag und Wasser verstanden. Zement ist das hydraulische Bindemittel, dass durch eine chemisch-mineralogische Reaktion mit Wasser (der Hydratation ¹) erhärtet und den Zuschlag miteinander verbindet. Als Zuschlag können natürlich vorkommender Naturstein (Kiessand, Brechsand, Splitt) oder künstliche organische Stoffe (Steinkohlenflugasche, Siliziumkarbid) verwendet werden. Durch die Kornzusammensetzung des Zuschlags wird die Dichte des HGB bestimmt. Die Kornzusammensetzung des Zuschlagsgemisches wird durch Siebversuche mit Prüfsieben bestimmt und mittels Sieblinien (siehe Abbildung 3.1) dargestellt.

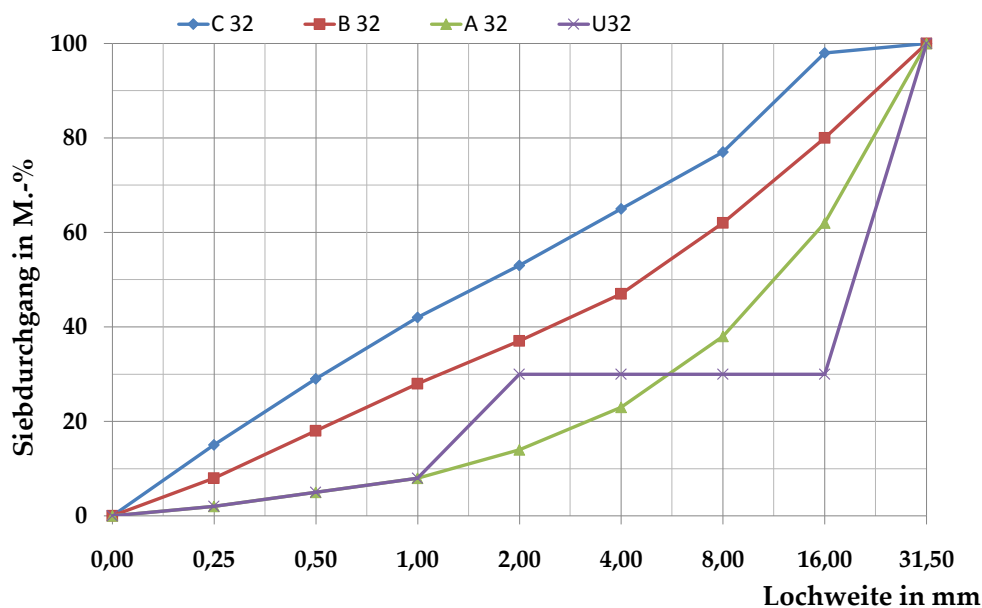


Abbildung 3.1: Sieblinien für Zuschlagsgemische mit einem Größtkorn $D=31,5$ mm, entnommen aus [Wes93]

¹Die Hydratation beginnt an der Oberfläche der Zementkörner und dringt zum Kern hin vor, solange das für die Reaktion erforderliche Wasser vorhanden ist. Dieser chemisch-physikalische Prozess führt zum Ansteifen, Erstarren und anschließendem Erhärten des Zement-Wasser-Gemisches. Das Erstarren und Erhärten beruht vor allem auf der Bildung kristallwasserhaltiger Verbindungen, die als Hydratphasen (CSH-Phasen) bezeichnet werden.[Hei09]

Neue Entwicklungen im Betonwesen, wie z. B. ultrahochfester Beton (*engl.: ultra high performance concrete UHCP*) oder selbstverdichtender Beton (*engl.: self compacting concrete SCC*) erfordern die Verwendung von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, wodurch Beton auch als 5-Stoff-System bezeichnet wird. Zusatzstoffe und Zusatzmittel verändern die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Betons. [Deu72, Wes93, Hum51, DKM03]

3.2 Selbstverdichtender Beton

In dieser Arbeit wird als Abformmasse selbstverdichtender Beton (kurz: SVB) eingesetzt. Unter SVB wird ein HGB verstanden, der ohne Entmischung und ohne Sedimentation bis zum Niveausgleich fließt (siehe Abbildung 3.2(a)).

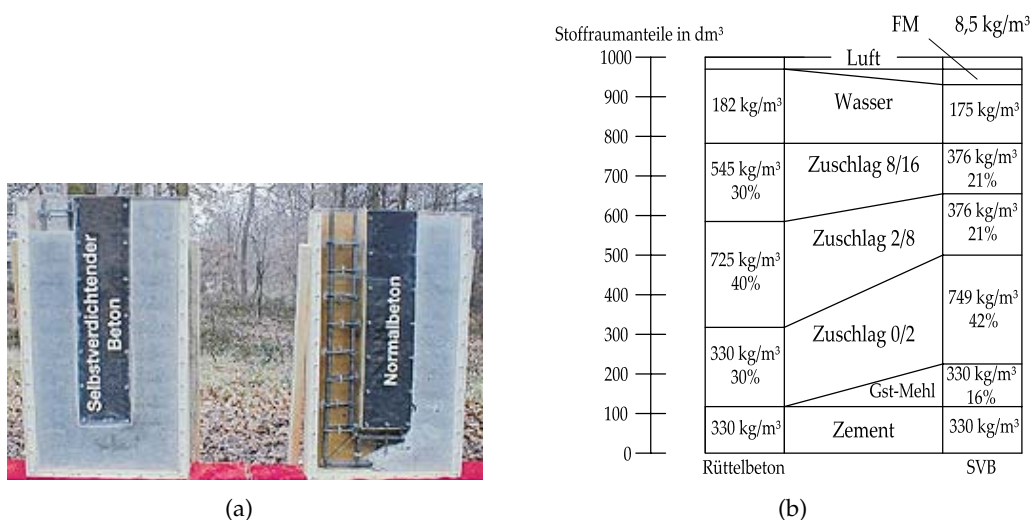


Abbildung 3.2: (a) Vergleich der Fließeigenschaften von SVB gegenüber Normalbeton und (b) zeigt den Vergleich der Stoffraumanteile von SVB gegenüber Normalbeton, entnommen aus [Bet09]

Die verbesserten Fließeigenschaften (Setzfließmaß² > 700 mm.) im Vergleich zum Normalbeton wurden durch die Entwicklung neuartiger Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) ermöglicht. SVB enthält Fließmittel und mehr Mehlkorn (SVB: 500-600 kg/m³, Normalbeton: 350-400 kg/m³ [Bet09]) als Normalbeton (siehe Abbildung 3.2(b)). Nach DAfStb-Richtlinie unterscheidet sich SVB von Normalbeton nur durch seine Frischbetoneigenschaften. Die Festbetoneigenschaften von SVB zeigen keine Abweichungen. Weiterhin ist bei der Herstellung von SVB zu beachten, dass dieser eine hohe Sensibilität gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe sowie der Betonzusammensetzung aufweist. Bei Unterschreitung des optimalen Wassergehaltes ist der SVB nicht mehr ausreichend fließfähig und kann nicht mehr selbstständig entlüften. [KB03, Bun09, Per07]

²Verfahren zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften nach DIN 12350-5 durch Messung der Ausbreitung von Beton auf einer flachen Platte

3.3 Materialprüfung

Beim Einsatz neuer Gestellwerkstoffe im Maschinenbau sind Kenntnisse zu deren Materialeigenschaften notwendig. Neben den thermischen und mechanischen Eigenschaften muss der SVB hinsichtlich Schwinden und Kriechen untersucht werden. Im folgenden Abschnitt wird die Herstellung der Probekörper für die Materialeigenschaften beschrieben. Die gemessenen Kennwerte werden im Abschnitt 3.4 mit Normalbeton und Gabbro verglichen. Mit Hilfe der Materialkennwerte und den Erkenntnissen aus weiteren Studien sollen Aussagen über die Eignung von SVB als Gestellwerkstoff für MPG getroffen werden. Um die Materialkennwerte wissenschaftlich verarbeiten und mit den anderen Gestellwerkstoffen vergleichen zu können, ist die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper nach DIN-Vorschriften durchzuführen. Begleitende DIN-Vorschriften in der Betontechnik sind die:

- DIN 1048 (*Prüfverfahren für Beton*)
- DIN EN 12390 (*Prüfung von Festbeton*)
- DIN EN 1770 (*Prüfverfahren: Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten*),

in denen die Anzahl der Probekörper, die Form und Abmessung der Probekörper, die zu verwendenden Prüfmaschinen und die durchzuführende Prüfung festgelegt sind. Geprüft werden folgende Eigenschaften:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| • mechanisch | • thermisch |
| – Biegezugfestigkeit | – thermischer Ausdehnungskoeffizient |
| – Spaltzugfestigkeit | – spezifische Wärmekapazität |
| – Druckfestigkeit | |
| – statisches Elastizitätsmodul | |
| – Poissonzahl | |

Herstellung der Probekörper

Die Herstellung und das Betonieren der Probekörper aus SVB wurde in Zusammenarbeit mit der *Bauhaus Universität Weimar* durchgeführt. Diese verfügt über die notwendige Erfahrung und das benötigte Equipment zur Herstellung und Lagerung der Proben. Die Fertigung der Probekörper setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- | | |
|-------------|--------------|
| 1. Dosieren | 3. Gießen |
| 2. Mischen | 4. Aushärten |

1. Dosieren

In diesem Arbeitsschritt werden die für die Herstellung von SVB benötigten Stoffe abgewogen und in separaten Behältern gelagert (siehe Abbildung 3.3).

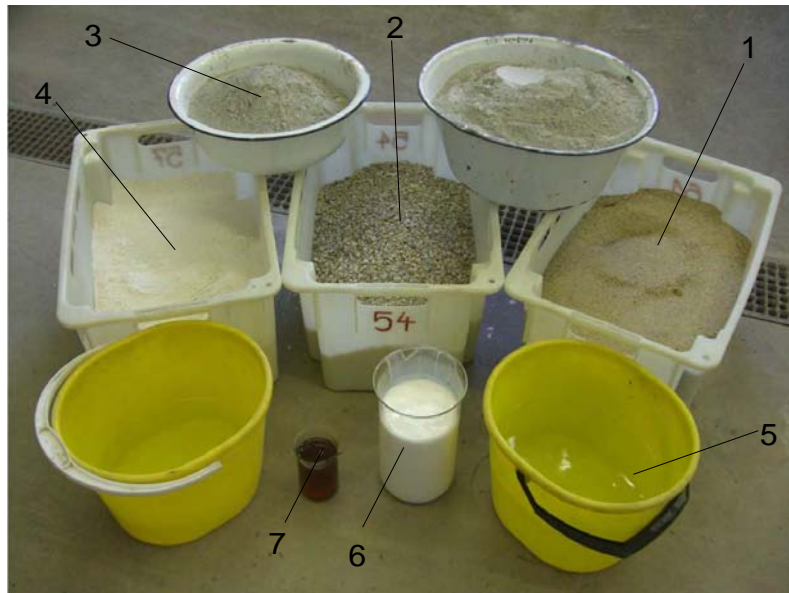


Abbildung 3.3: Stoffe zur Herstellung von SVB

- | | |
|--|----------------------|
| 1. Gesteinskörnung 2/8 ³ (Kies) | 5. Wasser |
| 2. Gesteinskörnung 0/2 (Sand) | 6. Polymerdispersion |
| 3. Zement (CEM III) | 7. Fließmittel |
| 4. Mehlkorn (Kalksteinmehl) | |

Die in dieser Arbeit verwendete SVB-Rezeptur wurde an der *Bauhaus Universität Weimar* entwickelt. Die genauen Masseverhältnisse werden daher nicht bekannt gegeben

2. Mischen

In diesem Arbeitsschritt werden die einzelnen Stoffe in einen Betonmischer gegeben und miteinander vermengt. Um eine optimale Durchmischung der einzelnen Stoffe zu erreichen, müssen diese in einer definierten Reihenfolge und für eine festgelegte Zeit vermengt werden. Dabei wurden die Stoffe wie folgt zugegeben:

1. Gesteinskörnung 0/2, 2/8 und 1/3 Wasser
2. Mehlkorn und Zement
3. Polymerdispersion und restliches Wasser
4. Fließmittel

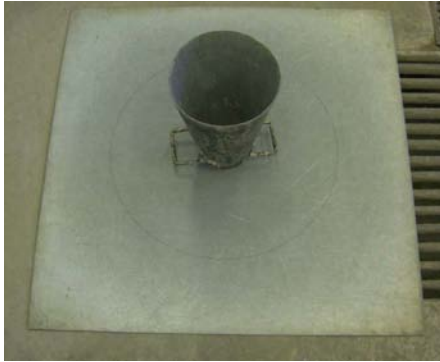


Abbildung 3.4: Ausbreittisch mit Trichter

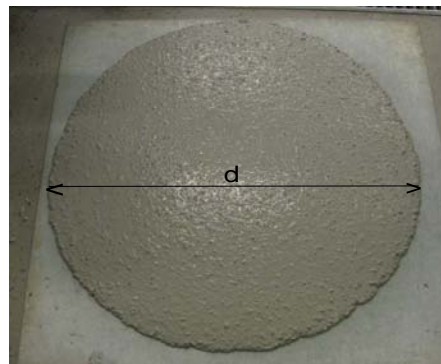


Abbildung 3.5: Befüllen des Trichters

Nachdem alle Stoffe, bis auf das Fließmittel, in den Betonmischer gegeben wurden, unterscheidet sich der SVB von Normalbeton nur durch einen geringeren Anteil an Anmachwasser. Erst nach Zugabe des Fließmittels entwickelt der SVB die gewünschte Fließfähigkeit. Bevor der SVB vergossen wird, ist das Setzfließmaß nach DIN EN 12350-5 [DIN EN 12350-5] zu prüfen [Wes93]. Auf einem Ausbreittisch wird ein Trichter mit definiertem Volumen gestellt (siehe Abbildung 3.4).



Abbildung 3.6: Ruckartiges Hochziehen des Trichters

Abbildung 3.7: Durchmesser d zur Bestimmung des Setzfließmaßes

Der Trichter wird mit SVB gefüllt (siehe Abbildung 3.5) und dann ruckartig nach oben gezogen und wenige Zentimeter über den Tisch gehalten (siehe Abbildung 3.6). Der SVB verteilt sich vollständig auf dem Ausbreittisch und ergibt den Durchmesser d für das Setzfließmaß (siehe Abbildung 3.7).

3. Gießen

Der fertige SVB in die vorgesehenen Schalungen gegossen. Dazu wird der SVB mittels einer Kelle in die Gusschalung bzw. Kunstoffschalung gefüllt. Für jeden Materialkennwert wurden jeweils drei Probekörper benötigt [DIN 1048-5].

^{32/8} bedeutet, dass das Größtkorn einen Durchmesser $< 8\text{ mm}$ und das Kleinstkorn einen Durchmesser $> 2\text{ mm}$ hat.

4. Aushärten

Die Probekörper werden nach dem Gießen mit Folie abgedeckt. Dadurch wird das zu schnelle Austrocknen der Betonoberfläche verhindert und eine optimale Hydratation gewährleistet. Die Probekörper werden nach $(24 \pm 2)h$ aus der Schalung entformt (siehe Abbildung 3.8(a)) [DIN 1048-5], im Anschluss für sechs Tage ins Wasserbad gelegt (siehe Abbildung 3.8(b)) und bis zur Prüfung trocken in einem klimatisierten Raum gelagert.

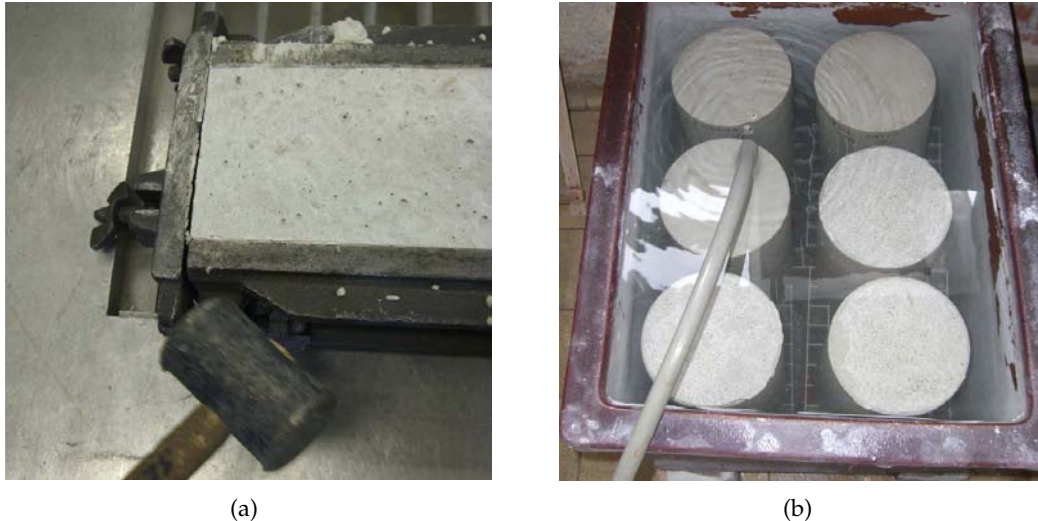


Abbildung 3.8: (a) Entschalen der Probekörper und (b) anschließende Feuchtlagerung für 6 Tage

Nach dem 28. Tag⁴ der Herstellung werden die Materialeigenschaften an den Probekörpern mittels ihrer spezifischen Prüfverfahren bestimmt. Die Form und Abmessung der Probekörper, die begleitenden DIN-Vorschriften sowie die Prüfung sind für jede Materialeigenschaft aus den erstellten Prüfplänen zu entnehmen (siehe Anhang B).

3.4 Materialeigenschaften

3.4.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des SVB, Normalbeton und Gabbro sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Im direkten Vergleich mit Normalbeton fallen die hohen Werte für Druckfestigkeit und E-Modul auf. Diese liegen im oberen Bereich im Vergleich zu den aus der Literatur entnommenen Kennwerte für Normalbeton. Der Vergleich zeigt, dass der verwendete SVB mechanische Eigenschaften aufweist, die einem Normalbeton gleichwertig sind. Dies ist anhand der beinahe übereinstimmenden stofflichen Zusammensetzung (siehe Abbildung 3.2(b)) auch

⁴Die Prüfung der Materialeigenschaften wird nach 28 Tagen durchgeführt, da der Beton zu diesem Zeitpunkt seine Nennfestigkeit erreicht hat.

zu erwarten, denn die einzigen Unterschiede liegen in dem geringeren Mehlkornanteil und dem zusätzlichem Fließmittel im SVB. Im Vergleich mit Gabbro sind dagegen die niedrigen Festigkeitswerte auffällig. Diese sind mindestens um den Faktor 2 kleiner, die Druckfestigkeit sogar um den Faktor 4.

Tabelle 3.1: Mechanische Eigenschaften von SVB im Vergleich mit weiteren Gestellwerkstoffen Normalbeton und Gabbro

Eigenschaft	Quelle	Druck- festigkeit β_D	Biegefestig- keit β_{Bz}	E-Modul β_E	Poissonzahl ν	Dichte
Einheit		N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	-	g/cm ³
SVB		58	3,6	33	0,23	2,2
Normalbeton	[Bau09, GWK01]	5-55	2,6-17,9	22-39	0,2	2-2,6
Gabbro	[OEL09b, Rei09a]	<250	10-25	60-90	-	2,8-2,9

Trotz der niedrigen Festigkeitswerte gegenüber dem Gabbro sprechen die mechanischen Eigenschaften des SVB nicht gegen den Einsatz als Gestellwerkstoff für MPG. Auch die niedrige Druckfestigkeit von SVB ist nicht als kritisch anzusehen. Gestelle werden von aerostatischen Führungen hauptsächlich auf Druck beansprucht, wobei die maximal erzeugte Flächenpressung eines Luftlagerelementes bei $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ [New09d] liegt. Als problematisch könnte sich die Härte des SVB (generell bei Beton) erweisen. Durch den Ausfall eines Luftlagerelementes, wird dieses sowie das Gestell mit den Führungsflächen beschädigt und muss ersetzt werden.

3.4.2 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften des SVB, Normalbeton und Gabbro sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Beim Vergleich von Normalbeton und SVB wird deutlich, dass die thermischen Kennwerte identisch sind. Auffällig ist der hohe Wert für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten $11,9 \mu\text{m}/\text{mK}$. Eine mögliche Erklärung kann in der Anpassung des Ausdehnungskoeffizienten von der genutzten Betonmischung an den von Baustahl ⁵ ($12 \mu\text{m}/\text{mK}$) liegen. Dies lässt schlussfolgern, dass der SVB nicht für die Aufgabe als Gestellwerkstoff optimiert wurde, sondern für den Einsatz als Stahlbeton. Im Gegensatz zum Gabbro ist der thermische Ausdehnungskoeffizient des SVB um den Faktor 2 größer. Die gemessenen Kennwerte für die Wärmeleitfähigkeit von

⁵Baustahl wird häufig als Bewehrungsmaterial für Beton eingesetzt. Um Spannungsrisse bei Temperaturänderungen zu vermeiden, sind nahezu identische thermische Ausdehnungskoeffizienten von Beton und Bewehrung erforderlich.

SVB liegen im Bereich von Normalbeton. Der Vergleich mit Gabbro zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 2 kleiner ist.

Tabelle 3.2: Thermische Eigenschaften von SVB im Vergleich mit weiteren Gestellwerkstoffe Normalbeton und Gabbro

Eigenschaft	Quelle	therm. Ausdehnungskoeff. α	spez. Wärmekapazität c	Wärmeleitfähigkeit λ
Einheit		$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
SVB		11,9	-	1,77
Normalbeton	[Bau09]	6-14	1,1-1,13	1,5-2,3
Gabbro	[OEL09b, Rei09a]	5-7	0,845	3,0

Wenngleich der thermische Ausdehnungskoeffizient um den Faktor 2 größer ist, sprechen die untersuchten thermischen Eigenschaften des SVB nicht gegen den Einsatz als Gestellwerkstoff. Die Standorte von MPG beschränken sich auf klimatisierte Räume, in denen konstante Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse herrschen. Aus diesem Grund sind die Kennwerte nicht als kritisch zu betrachten. Durch eine Optimierung des SVB ist es weiter möglich, dessen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in bestimmten Grenzen weiter zu verringern.

3.4.3 Schwinden

Beim Gießen von visco-elastischen Baustoffen, bei denen Oberflächen mit einer hohen Abformgenauigkeit erzielt werden sollen, muss das Schwinden berücksichtigt werden. Beeinflusst wird dieser Vorgang durch [Wal97, DKM03]:

- Mischungsverhältnis
- Abmessung des Bauteils
- Feuchtigkeit
- Umgebungstemperatur

Unter dem Begriff Schwinden wird die lastunabhängige, aber zeitveränderliche Verkürzung des Zementsteins durch Austrocknung verstanden [DKM03]. SVB schwindet beim Erhärten an der Luft so lange, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen Luftfeuchtigkeit und Betonfeuchtigkeit eingetreten ist. Durch das Austrocknen des SVB bildet sich über den gesamten Querschnitt von Innen nach Außen ein Feuchtigkeitsgefälle. Das Schwinden der äußeren Schichten wird durch den feuchten, noch nicht schwindenden Kern behindert. Die Hinderung des SVB am Schwinden führt zu Schwindspannungen, die bei Überschreitung der Betonzugfestigkeit Schwindrisse verursachen. Durch eine spezielle Behandlung der Oberfläche können Schwindrisse verringert

werden. Abbildung 3.9 zeigt den Verlauf des Schwindens für Normalbeton bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen. [Hum51, Wes93, Deu72]

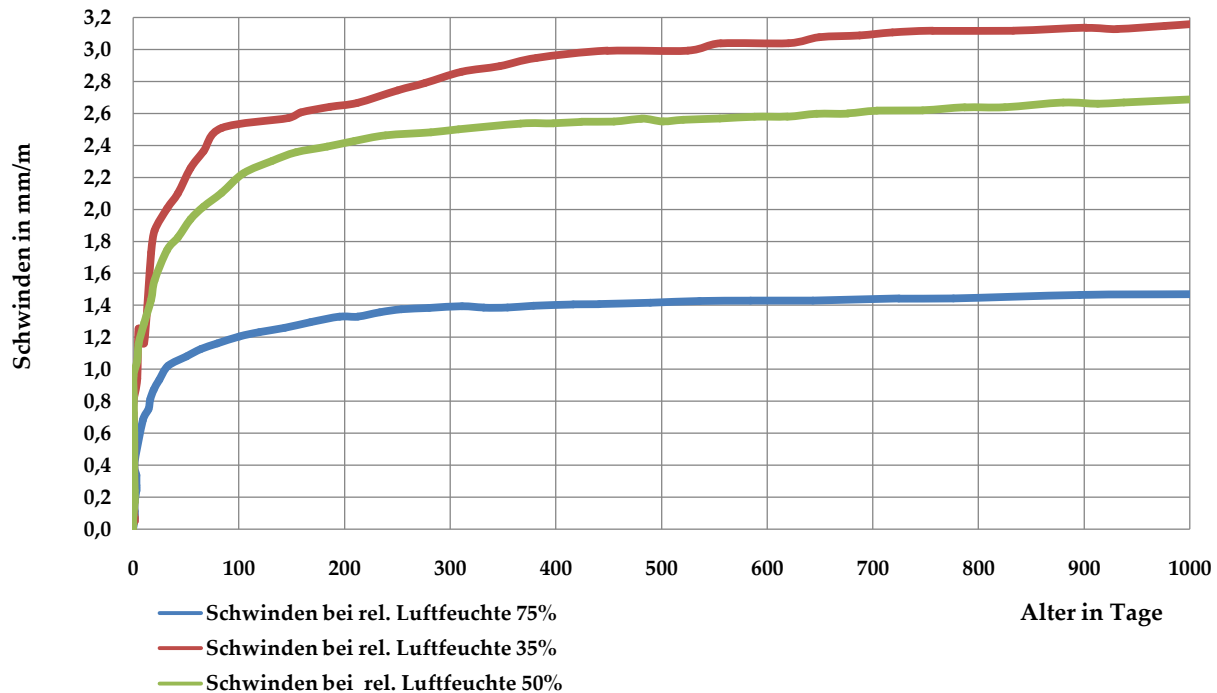


Abbildung 3.9: Vergleich des Schwindens von Normalbeton an der Luft bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 35,% und 75 %, entnommen aus [Wes93]

Das Schwinden wurde an sechs Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm bestimmt. An den Stirnseiten wurden Messzapfen (nach DIN EN 1770) eingegossen. Die Probekörper wurden nach dem Entschalen (nach $(24 \pm 2)h$) direkt vermessen⁶ und in der DIN vorgeschriebenen Zeitabständen wiederholt. Die Messwerte wurden für die jeweiligen Probekörper in einem Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 3.10). Die Messungen ergaben ein Schwinden bei den Proben 1...3 von $0,124 \text{ mm/m}$ und bei den Proben 4...6 von $0,093 \text{ mm/m}$ nach 28 Tagen. Anhand der sechs Probekörper wurde ein Schwinden von $0,1085 \text{ mm/m}$ nach 28 Tagen berechnet.

Der Vergleich des Schwindens von SVB mit vorangegangenen Studien von C.-A. GRAUBNER [GLP02], H. GRUBE [GR99] und R. LOSER [LL09] ist in Tabelle 3.3 dargestellt. GRAUBNER, LIEBERUM, PROSKE sowie LOSER, LEEMANN untersuchten das Schwinden an verschiedenen SVBs durch Variation der Masseverhältnisse. Aus den Untersuchung wird deutlich, dass die SVBs ein fast identisches Schwinden aufweisen (siehe Abbildung 3.11), sowohl nach 28 als auch nach 90 Tagen. Durch eine Optimierung des Masseverhältnisses konnte in ihren Untersuchungen das

⁶Bei jeder Messung muss die Lage des Probekörper im Messgerät die gleiche sein. Vor und nach dem Messen sind Kalibrierungsprüfungen mittels Referenzprüfkörper durchzuführen. Bei Abweichungen gegenüber der Anfangsmessung ist die Differenz bei der Beurteilung des Schwindens zu berücksichtigen. [DIN EN 1048-5]

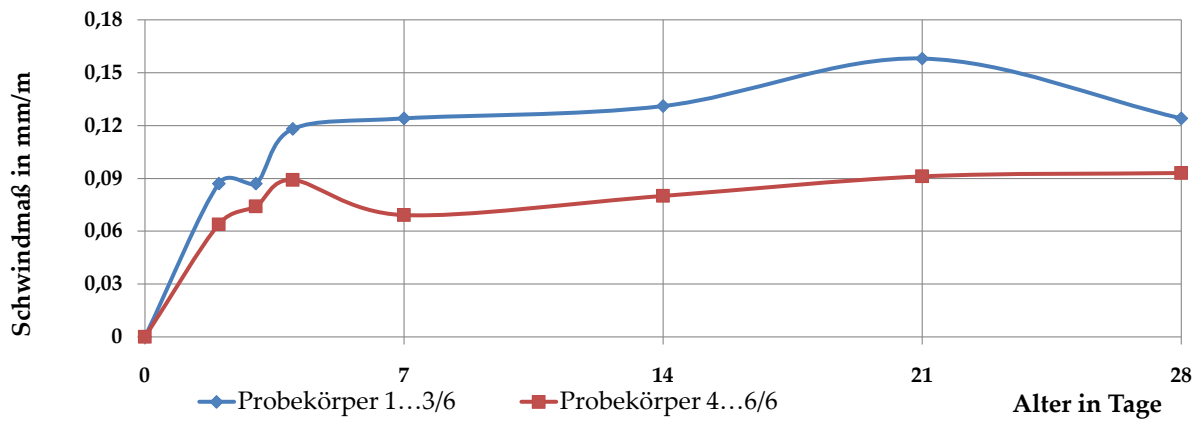


Abbildung 3.10: Vergleich des Schwindmaß der verwendeten SVB-Rezeptur an den Prismen 1...3/6 und 4...6/6 bis zum 28. Tag nach der Herstellung

Schwinden in bestimmten Grenzen verringert werden. Die Masseverhältnisse der untersuchten SVB-Rezepturen siehe [LL09].

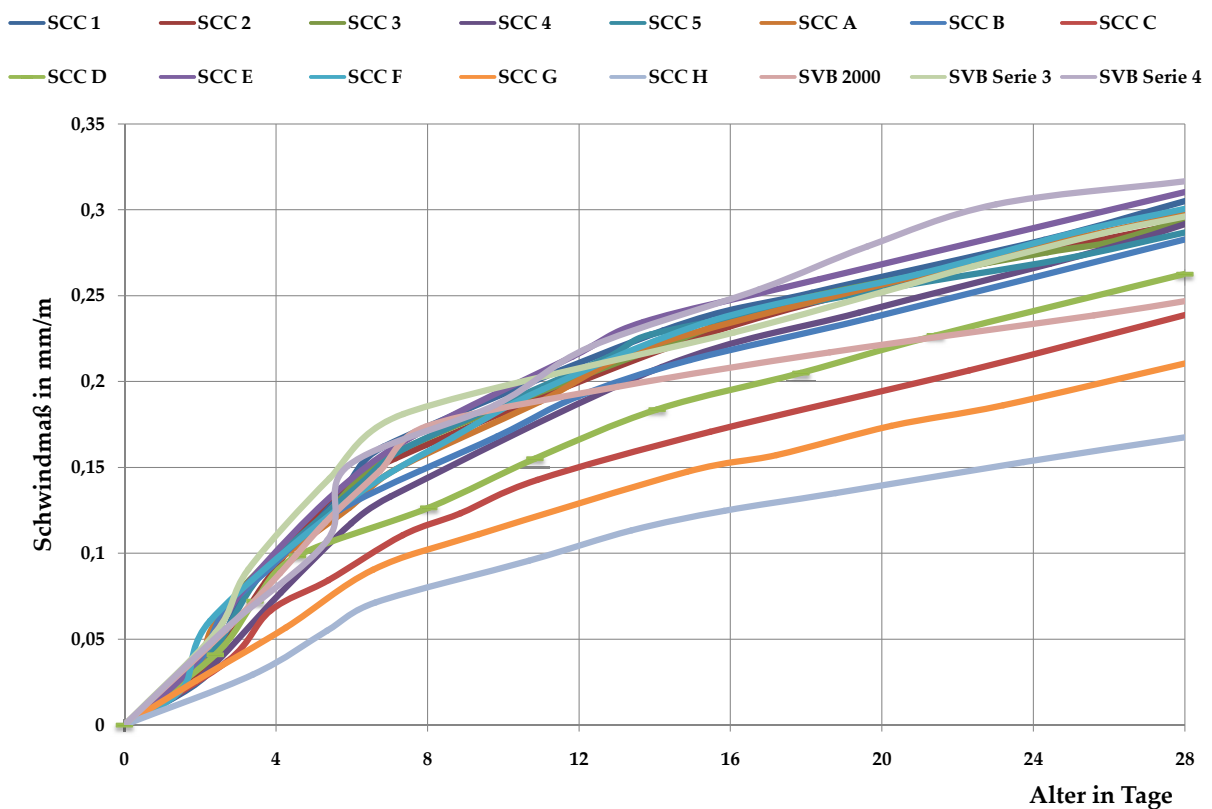


Abbildung 3.11: Vergleich des Schwindmaß verschiedener SVB-Rezepturen aus den vorangegangenen Studien von C.-A. GRAUBNER, H. GRUBE und R. LOSER, entnommen aus [GLP02, LL09, GR99]

Der Vergleich mit anderen Studien zeigt, dass der verwendete SVB nach 28 Tagen ein deutlich geringeres Schwindverhalten aufweist. Der Grund kann in dem relativ kleinen Volumen der hier verwendeten Probekörper ($V \geq 0,256 \text{ dm}^3$) im Vergleich zu LOSER, LEEMANN und GRUBE, RICKERT ($V \geq 5,1 \text{ dm}^3$) gesehen werden. Aus den Studien kann entnommen werden, dass das Schwindverhalten von SVB im Bereich von Normalbeton ($2\text{-}4 \text{ mm/m}$) [Wes93]) liegt [GLP02].

Tabelle 3.3: Vergleich des Schwindens des SVB mit vorangegangenen Untersuchungen [GLP02, LL09, GR99]

Autor	Quelle	Probekörper [mm]	Volumen [dm ³]	Bezeichnung SVB	Schwindmaß [mm/m]	
					28d	90d
GRAUBNER, LIEBERUM, PROSKE	[GLP02]	-	-	SVB (2000)	0,235	0,285
				SVB Serie 3	0,314	0,414
				SVB Serie 4	0,288	0,392
GRUBE, RICKERT	[GR99]	Ø150x300	5,301	SVB	-	0,414
LOSER, LEEMANN	[LL09]	120x120x360	5,184	SCC 1	-	0,43
				SCC 2		0,40
				SCC 3		0,43
				SCC 4		0,43
				SCC 5		0,40
				SCC A	0,294	0,42
				SCC B	0,276	0,41
				SCC C	0,235	0,34
				SCC D	0,258	0,38
				SCC E	0,305	0,42
				SCC F	0,288	0,41
				SCC G	0,210	0,31
				SCC H	0,164	0,26

In welchem Ausmaß das Schwinden die Eignung von SVB als Gestellwerkstoff für MPG beeinflusst, kann nicht eindeutig erklärt werden. Problematisch wird das Schwinden erst an der Oberfläche, welche direkt als Führungsflächen vorgesehen ist. Aufgrund der relativ kleinen Probekörper, im Vergleich zu konventionell eingesetzten Gestellen, ist es nicht möglich, die gemessenen Kennwerte zu skalieren um daraus Rückschlüsse zu ziehen. Hierzu müssen separate Untersuchungen an groß dimensionierten Probekörpern ($V \geq 1 \text{ m}^3$) durchgeführt werden.

3.4.4 Kriechen

Unter dem Kriechen wird die Verformung des Zementsteins unter Dauerbelastung verstanden. Wird der SVB beim Erhärten belastet, so finden Kriechen und Schwinden gemeinsam statt. Das Ausmaß des Kriechens ist wie das Schwinden von bestimmten Faktoren abhängig (siehe Abschnitt 3.4.3). Weiterhin großen Einfluss auf das Kriechen haben [Wal97, DKM03]:

- das Alter des SVB im Moment der Lasteinwirkung, sowie
- die Art und Größe der Beanspruchung

Das Kriechen des in der Arbeit eingesetzten SVB wurde nicht untersucht. Für Informationen über das Kriechverhalten werden vorangegangene Studien herangezogen. GRAUBNER, LIEBERUM und PROSKE untersuchten in ihrer Arbeit [GLP02] das Kriechverhalten an fünf verschiedene SVB-Rezepturen. Davon wurden drei SVB-Probekörper nach 28 Tagen belastet und in einer zweiten Messreihe zwei SVB-Probekörper nach dem ersten Tag der Herstellung. Die Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von 350 Tagen durchgeführt und folgende Erkenntnisse gewonnen [GLP02]:

- SVB mit geringem Mehlkorngesamt weist günstigeres Kriechverhalten auf
- Schwankungen im w/z -Wert⁷ beeinflusst das Kriechverhalten
- SVB nicht nach 1. Tag der Herstellung belasten
- Kriechen nach 1. Jahr konstant

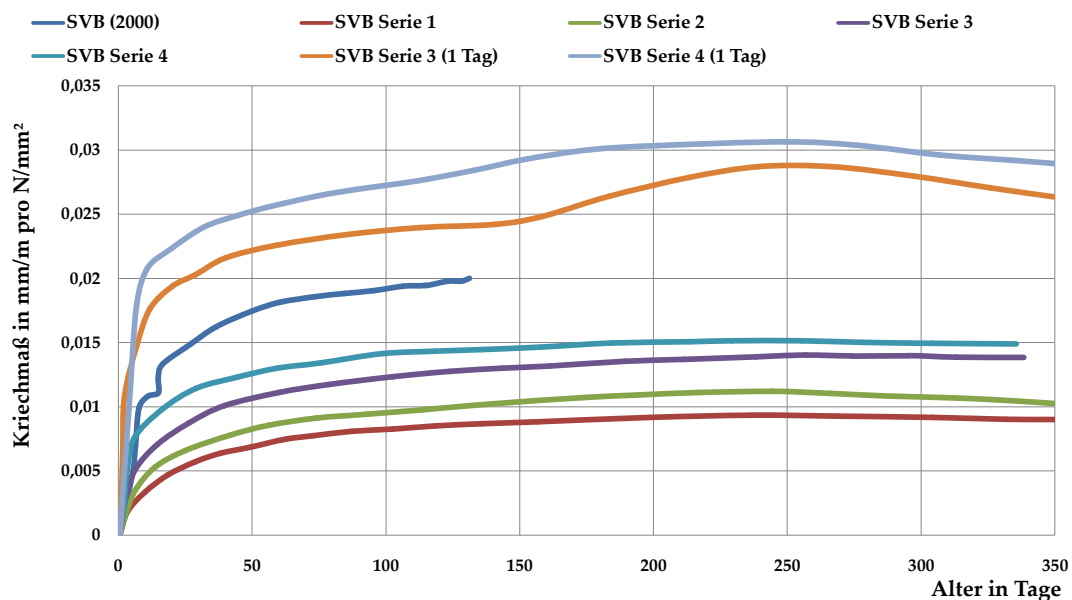


Abbildung 3.12: Vergleich des Kriechmaßes in mm/m verschiedener SVB-Rezepturen aus den vorangegangenen Studien von GRAUBNER, LIEBERUM und PROSKE, entnommen aus [GLP02]

⁷Wassers-zementwert (auch w/z -Wert) bezeichnet das gewichtsbezogene Verhältnis aus Wasser zu Zement.

Hieraus lässt sich ableiten, dass SVB hinsichtlich seines Kriechverhaltens durch die Optimierung des Masseverhältnisses in einem bestimmten Maße (siehe Abbildung 3.12) verkleinert werden kann. Des Weiteren zeigten die Studien, dass eine Belastung des SVB nach dem Entschalen vermieden werden sollte. Aussagen über den frühestmöglichen Zeitpunkt zu dem SVB belastet werden darf, konnten aus den Studien nicht getroffen werden.

3.5 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass SVB von seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften als Gestellwerkstoff für MPG geeignet ist. SVB erreicht im Vergleich zum Gabbro nicht die Festigkeits- und thermischen Kennwerte. Trotzdem sind diese für das vorgesehene Einsatzgebiet als Grundgestell für aerostatische Führungen annehmbar. Durch die Optimierung der Masseverhältnisse besteht die Möglichkeit, den SVB hinsichtlich bestimmter Eigenschaften zu verändern. Hierzu sollte beachtet werden, dass eine mögliche Verbesserung der thermischen Eigenschaften eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften mit sich bringen kann. Schwierigkeiten könnten ausschließlich durch das Schwinden und Kriechen unter Last entstehen. Hierzu sind separate Untersuchungen notwendig, um die Effekte zu beurteilen und konstruktiv entgegenwirken zu können.

4 Oberflächenanalyse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Rauheitsmessungen der eingesetzten Abformlehren dargestellt. Es wird das eingesetzte Messgerät und die durchgeführte messtechnische Erfassung der Messwerte beschrieben. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Bestimmung des Mittenrauwertes R_a und der gemittelten Rautiefe R_z . Die messtechnische Erfassung der Ebenheit wird aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Arbeit nicht durchgeführt. Die Vorgehensweise wird äquivalent auf die abgeformten SVB-Oberflächen zur Bestimmung von R_a und R_z angewandt.

4.1 Beschreibung der Messaufgabe

Das Ziel dieser Oberflächenanalyse ist es zum einen, Aussagen über die Abformgenauigkeit zwischen dem SVB und der eingesetzten Abformlehre zu treffen. Die Beurteilung der Abformgenauigkeit erfolgt durch den Vergleich der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefe R_z der Abformlehren sowie der darauf abgeformten SVB-Oberflächen. Zum anderen werden die Oberflächenkennwerte R_a und R_z für die Beurteilung der SVB-Oberflächen, hinsichtlich der Eignung als Führungsfläche für aerostatische Führungen, herangezogen.

4.2 Messgerät

Die messtechnische Erfassung der *Istoberfläche* der Abformlehren erfolgte vor dem Betonieren mit dem *Perthometer M1* der Firma *Mahr GmbH* (siehe Abbildung 4.2). Beim *Perthometer M1* handelt es sich um ein taktils Profilometer, welches nach dem Tastschnittverfahren arbeitet (Technische Daten siehe Anhang D). Es handelt sich um eine messtechnische Methode zur zweidimensionalen Erfassung einer Oberfläche. Eine Vorschubeinrichtung bewegt ein Tastsystem mit konstanter Geschwindigkeit horizontal über die Oberfläche (siehe Abbildung 4.1). Beim Taster handelt es sich um eine Baugruppe, die das Tastelement mit der Tastspitze aus einer Diamantnadel und dem mechanisch-elektrischen Wandler enthält. Die Geometrie der Diamantnadel ist in der DIN EN ISO 3274 [DIN EN ISO 3274] genormt. Das *Perthometer M1* hat eine Diamantnadel mit einem Kegelwinkel von 90° und einen Spitzenradius von $2\text{ }\mu\text{m}$. Die Auslenkungen der Tastspitze werden über das Tastelement zum mechanisch-elektrischen

- 1 Werkstückauflage
- 2 Werkstück
- 3 Tastelement
- 4 Taster
- 5 Messkreis
- 6 Säule
- 7 Vorschubgerät
- 8 Grundplatte

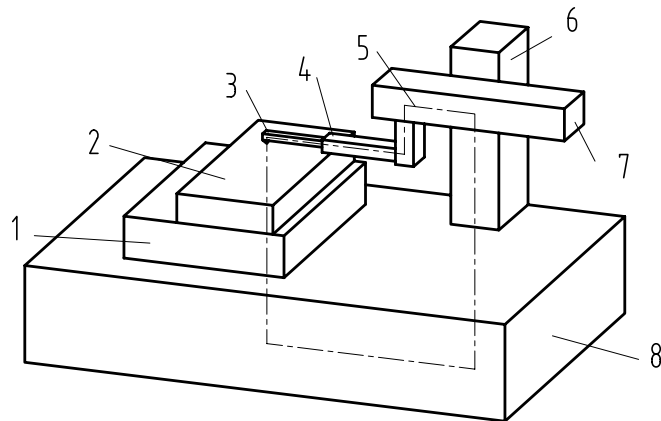


Abbildung 4.1: Prinzipdarstellung des Tastschnittgerätes als Messkreis mit allen mechanischen Komponenten, die mit dem Werkstück und der Tastspitze verbunden sind, entnommen aus [DIN EN ISO 3274]

Wandler übertragen. Beim Messwandler handelt es sich um eine Einrichtung, welche die vertikale Koordinate des ertasteten Profils, bezogen auf das Referenzprofil, in das im Messgerät verwendete Signal umwandelt. Über einen Analog-Digital-Umsetzer wird das im Messgerät vorliegende Signal in digitale Werte umgesetzt. [DIN EN ISO 3274, Ban04]



Abbildung 4.2: Messgerät zur Oberflächenanalyse: *Perthometer M1* der Firma *Mahr GmbH*

Das aufgezeichnete Profil der Messstrecke l_n enthält die Gestaltkennwerte Formabweichung (1. *Ordnung*), Welligkeit (2. *Ordnung*) und Rauheit (3.-5. *Ordnung*). Um die einzelnen Gestaltkennwerte messtechnisch zu unterscheiden, werden verschiedene Profilfilter eingesetzt. Profilfilter trennen das Gesamtprofil in langwellige Anteile, die dem Welligkeitsprofil¹ zugeordnet werden und in die kurzwelligen Anteile, die das Rauheitsprofil bilden. Durch den λ_c -Profilfilter werden die langwelligen Profilanteile herausgeschnitten. Das entstandene Rauheitsprofil dient als

¹Profil, welches durch die Anwendung der Profilfilter λ_f und λ_c entsteht. Hierzu werden mit dem λ_f -Profilfilter die langwelligen und mit dem λ_c -Profilfilter die kurzwelligen Anteile abgetrennt [DIN EN ISO 4287].

Grundlage für die Berechnung der Kenngrößen R_a und R_z . Mit dem *Perthometer M1* konnten nur die Oberflächenkennwerte R_a , R_z und R_{max} berechnet werden.

4.3 Taststrecke

Unter der Taststrecke wird die Strecke verstanden, welche das Tastsystem während der Erfassung des Profils zurücklegt. Die Taststrecke ist die Summe aus der Vorlaufstrecke², der Messstrecke l_n und der Nachlaufstrecke. Die Messstrecke l_n ist die Länge der Richtung in der X-Achse, die für die Auswertung des Profils verwendet wird [DIN EN ISO 4287].

Tabelle 4.1: Wahl der Einzelmessstrecken l_n und Grenzwellenlänge λ_c nach DIN EN ISO 4288, entnommen aus [DIN EN ISO 4288]

Aperiodische Profile		Grenzwellenlänge (cut-off)	Einzelmessstrecke (l_r) / Messstrecke (l_n)
R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	l_r / l_n (mm)
> (0,025) bis 0,1	> (0,006) bis 0,02	0,08	0,08 / 0,40
> 0,1 bis 0,5	> 0,02 bis 0,1	0,25	0,25 / 1,25
> 0,5 bis 10	> 0,1 bis 2	0,8	0,8 / 4,0
> 10 bis 50	> 2 bis 10	2,5	2,5 / 12,5
> 50 bis 200	> 10 bis 80	8	8,0 / 40

Die Messstrecke l_n umfasst im Standardfall für Rauheitsmessungen fünf aufeinanderfolgende Einzelmessstrecken l_r ³. Die Kenngrößen des Rauheitsprofil werden, insofern nicht angegeben, an den Einzelmessstrecken l_r definiert. Nach DIN EN ISO 4288 [DIN EN ISO 4288] ist die Einzelmessstrecke l_r festgelegt und wie folgt durchzuführen:

1. Der unbekannte Wert für den Mittenrauwert R_a oder der gemittelten Rautiefe R_z ist durch eine Stichprüfung⁴ zu schätzen.
2. Auswahl der Einzelmessstrecke l_r aus Tabelle 4.1 unter Verwendung der Schätzwerte für R_a und R_z aus der Stichprüfung.
3. Mit Hilfe des *Perthometer M1* und unter Zugrundelegung der nach Schritt 2 gewählten Einzelmessstrecke sind die Messergebnisse von R_a und R_z zu ermitteln.

²Die Vor- und Nachlaufstrecke dient zum Ein- und Ausschwingen der Profilfilter.

³Die Einzelmessstrecke für die Rauheit und für die Welligkeit ist zahlenmäßig gleich der Grenzwellenlänge des Profilfilters λ_c bzw. λ_f [DIN EN ISO 4287].

⁴Messung des Mittenrauwert und der gemittelten Rautiefe mit beliebig gewählter Einzelmessstrecke l_r [DIN EN ISO 4288].

4. Die messtechnisch erfassten Kennwerte für R_a und R_z sind mit dem Wertebereich von R_a und R_z in Tabelle 4.1 entsprechend der gemessenen Einzelmessstrecken zu vergleichen. Liegen die Kennwerte außerhalb des Wertebereiches für die Einzelmessstrecke, muss eine Längere bzw. Kürzere gewählt werden.

Die Stichprüfung ist nach DIN EN ISO 4288 an mindestens drei Messstrecken durchzuführen. Entweder auf dem Teil der Oberfläche, von dem der höchste Kennwert erwartet wird, oder gleichmäßig verteilt, wenn die Oberfläche einen homogenen Eindruck macht [DIN EN ISO 4288].

Tabelle 4.2: Mittelwerte des Mittenrauwert R_a und der gemittelte Rautiefe R_z der Abformlehren zur Bestimmung der Einzelmessstrecke l_r nach DIN EN ISO 4288

Abformlehre	Mittenrauwert R_a [μm]			gemittelte Rautiefe R_z [μm]		
	1	2	3	1	2	3
Gabbro	0,149	0,400	0,183	2,400	2,770	2,970
Mittelwert	0,366			5,07		
Borosilicatglas	0,006	0,007	0,006	0,08	0,07	0,021
Mittelwert	0,0095			0,0855		
Kalk-Natron-Glas	0,01	0,006	0,006	0,07	0,05	0,07
Mittelwert	0,011			0,095		

Für die Stichprüfung wurde eine Einzelmessstrecke von $l_r = 0,8 \text{ mm}$ gewählt. Mit einer Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ ergibt sich eine Taststrecke $l = 5,6 \text{ mm}$. In Tabelle 4.2 sind die messtechnisch erfassten Mittelwerte für den Mittenrauwert R_a und der gemittelten Rautiefe R_z zusammengefasst.

Bei der messtechnischen Erfassung der Oberflächenkennwerte von Gabbro muss eine Einzelmessstrecke $l_r = 0,8 \text{ mm}$ gewählt werden. Damit ergibt sich eine Messstrecke von $l_n = 4,0 \text{ mm}$.

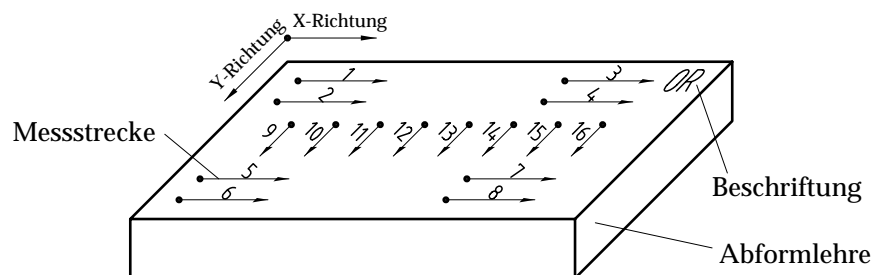


Abbildung 4.3: Übersicht der 16 Messstrecken zur messtechnischen Erfassung des Mittenrauwertes R_a und der gemittelten Rautiefe R_z der Abformlehren sowie der darauf abgeformten SVB-Oberflächen

Für die messtechnische Erfassung der Oberflächenkennwert R_a und R_z von BSG und KNG ist eine Einzelmessstrecke von $l_r = 400 \mu\text{m}$ zu wählen. Vor der Messung des Mittenrauwert R_a und der gemittelten Rautiefe R_z wurden die Abformlehren beschriftet⁵. Für die Bestimmung der Oberflächenkennwerte wurden je Oberfläche 16 definierte Messstrecken abgefahren. Davon jeweils acht Messstrecken in X-Richtung und acht in Y-Richtung (siehe Abbildung 4.3). Die Abstände zwischen den einzelnen Messstrecken variierten je Messung. Anhand der 16 Einzelmessungen wurde der Mittelwert für die gemittelte Rautiefe R_z und des Mittenrauwertes R_a bestimmt.

4.4 Messergebnis der Abformlehren

Abbildung 4.4 stellt die messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte R_a und R_z der eingesetzten Abformlehren dar.

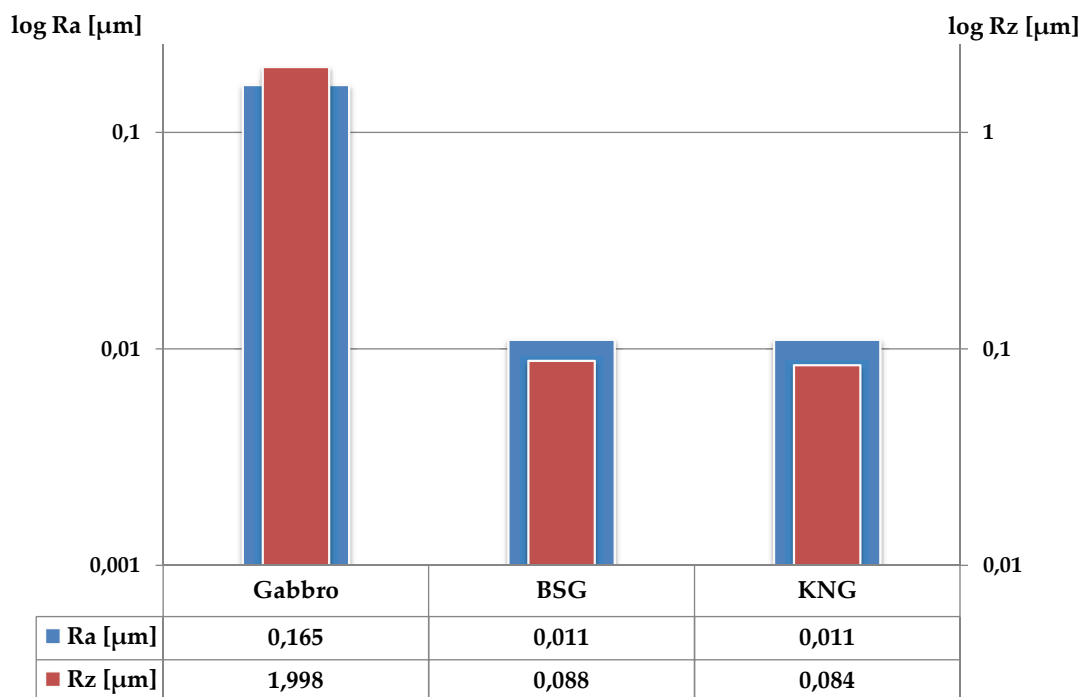


Abbildung 4.4: Graphische Darstellung des gemessenen Mittenrauwertes R_a und der gemittelten Rautiefe R_z der einzelnen Abformlehren vor dem Betonieren mit SVB

Mit dem *Perthometer M1* konnte der Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z der Gläser (BSG und KNG) nicht über die geforderte Einzelmessstrecke l_r nach DIN EN ISO 4288 [DIN EN ISO 4288] bestimmt werden. Die Stichprüfung (siehe Tabelle 4.2) zeigte, dass für die Gläser (BSG und KNG) eine Einzelmessstrecke $l_r = 80 \mu\text{m}$ zu wählen ist. Aus den technischen

⁵Kennzeichnung der Proben mit „OR“ für oben rechts.

Daten des *Perthometer M1* (siehe Anhang D) kann entnommen werden, dass die kleinstmögliche und wählbare Einzelmessstrecke $l_r = 250 \mu\text{m}$ ist. Für die messtechnische Erfassung der R_a - und R_z -Werte der Gläser wurde mit einer Einzelmessstrecke $l_r = 250 \mu\text{m}$ durchgeführt.

5 Experimentelle Untersuchungen

Das Ziel der Versuche ist es einerseits den Haftverbund zwischen der Abformlehre und dem SVB zu untersuchen. Anhand der Untersuchung soll die Eignung der Abformlehren in Kombination mit dem eingesetzten SVB für das *direkte Abformen* beurteilt werden. Der Haftverbund wird durch Messung der Zugkraft beurteilt, die aufgebracht werden muss, um Abformlehre und SVB voneinander zu trennen.

Andererseits werden die Oberflächenparameter der Rauheit der abgeformten SVB-Oberflächen messtechnisch erfasst. Anhand dieser können Aussagen zur Abformgenauigkeit und über die Eignung als Führungsfläche für aerostatische Führungen getroffen werden. Es wurden die Oberflächenkennwerte (Mittenrauwert R_a und gemittelte Rautiefe R_z) gemessen. Messungen zur Ebenheit wurden nicht durchgeführt und sind aufgrund der geringen Oberfläche der betonierten Probekörper ($A = 100 \text{ mm}^2$) nur eingeschränkt aussagekräftig.

5.1 Versuchsplanung und -durchführung

Die Haftverbunduntersuchungen für das *direkte Abformen* wurden in zwei Versuchsreihen durchgeführt. In der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) wird der flüssige SVB direkt auf die unbehandelten Abformlehren (Gabbro, BSG und KNG) gegossen. Unbehandelt bedeutet in diesem Fall, dass die Oberfläche der Abformlehre vor dem Betonieren gesäubert, nicht jedoch beschichtet oder versiegelt wurde. Die Messung der Zugfestigkeit zwischen der Abformlehre und dem SVB erfolgte im Alter von einem und sieben Tagen nach dem Betonieren. Die ausgewählten Zeitpunkte zur Messung der Zugfestigkeit sind wie folgt zu erklären:

- Nach einem Tag werden die Probekörper aus den Schalungen entfernt. Diese werden anschließend für sechs Tage [DIN 1048-5] feucht gelagert. In diesem Fall in einem Wasserbad bei einer Wassertemperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ [DIN EN 12390-2]. Durch die Feuchtlagerung nimmt der SVB Wasser auf, welches für den Verlauf der Hydration¹ benötigt wird. Der maximale Hydrationsgrad ist von der Betonfeuchte abhängig. Solange genügend Feuchtigkeit und unhydratisierter Zement vorhanden sind, nimmt der Hydrationsgrad zu. Fehlt die benötigte Feuchtigkeit, kann die Hydratation gestört oder beendet werden, wodurch große Schwindspannungen auftreten. [Wes93]

¹Erhärten des Zements durch Bildung wasserhaltiger Verbindungen, die bei der chemischen Reaktion zwischen den Zementbestandteilen und dem Anmachwasser entstehen.

- Sieben Tage nach der Herstellung werden die Probekörper aus dem Wasserbad genommen. Innerhalb dieses Zeitraumes ist die Hydratation nahezu vollständig abgeschlossen.

Die Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) soll zeigen, inwiefern das *direkte Abformen* von SVB auf den Abformlehren Gabbro, BSG und KNG möglich ist. Die beiden Zeitpunkte sollen Auskunft geben, wie der Haftverbund und die Abformgenauigkeit durch die Kontaktzeit zwischen SVB und Abformlehre beeinflusst wird.

In der zweiten Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) werden die Oberflächen der Abformlehren mit verschiedenen Stoffen beschichtet oder versiegelt. Die Stoffe sollen auf der Oberfläche eine Trennschicht erzeugen, sowie die Oberfläche selbst verändern. Das Ziel dieser Beschichtung ist es, einen direkten Kontakt des SVB auf der Oberfläche der Abformlehre und somit einen möglichen Haftverbund zu verhindern. Die Untersuchung des Haftverbundes zwischen der Abformlehre und dem SVB wird im Probenalter von einem Tag durchgeführt. Durch den Einsatz des Trennmittels wurde vermutet, dass es zu keinem bzw. einem minimalen Haftverbund zwischen Abformlehre und SVB kommt.

Die Messergebnisse zum Haftverbund werden zu Beginn der Auswertung nur innerhalb der einzelnen Abformlehren betrachtet. Hierbei soll festgestellt werden, in welchem Bereich die Kennwerte für die Zugfestigkeit liegen und inwiefern diese innerhalb der drei Probekörper streuen. Anschließend werden die erzielten Zugfestigkeiten der beiden Versuchsreihen miteinander verglichen um darzulegen, bei welcher Variante der geringste Haftverbund existiert. Angesichts der zahlreichen Versuche wurden nur drei Probekörper pro Abformlehre je Zeitpunkt betoniert. Die in dieser Arbeit erzielten Kennwerte zum Haftverbund und zur Abformgenauigkeit sollen lediglich als Grundlagenuntersuchungen betrachtet werden. Die Generierung von statistisch abgesicherten Messergebnissen ist aufgrund des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit nicht möglich, da mindestens 30 Messungen nötig sind. Die erzielten Messergebnisse dienen daher nur zur Abschätzung des Haftverbundes.

Das Betonieren der Probekörper wurde in Zusammenarbeit mit der *Bauhaus Universität Weimar* durchgeführt. Diese verfügt neben Erfahrung auch über das notwendige Equipment zur Herstellung, Lagerung und Prüfung des Haftverbundes der Probekörper. Die Probekörper wurden analog zu den Probekörpern für die Materialprüfung hergestellt (siehe Abschnitt 3.3).

Abmessung Abformlehre

Die Abmessungen der Abformlehren werden durch die zum Einsatz kommenden Schalungen (siehe Abbildung 5.1) bestimmt. Diese werden von der *Bauhaus Universität in Weimar* gestellt und haben ein Volumen von 100 cm^3 mit den Abmessungen $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ($B \times H \times T$). Für das *Abformen* ist nur die Grundfläche der Abformlehre interessant, weshalb die maximalen Abmessungen nur $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ($B \times H$) betragen dürfen. Aus diesem Grund ist die Höhe der Abformlehre nicht relevant, sollte aber nicht mehr als $1/3$ der Schalungshöhe betragen. Die Abmessungen der Abformlehren sind ($B \times H \times T$):

- Gabbro: 100 mm x 100 mm x 30 mm
- Kalk-Natron-Glas: 100 mm x 100 mm x 3,3 mm
- Borosilicatglas: 100 mm x 100 mm x 7 mm

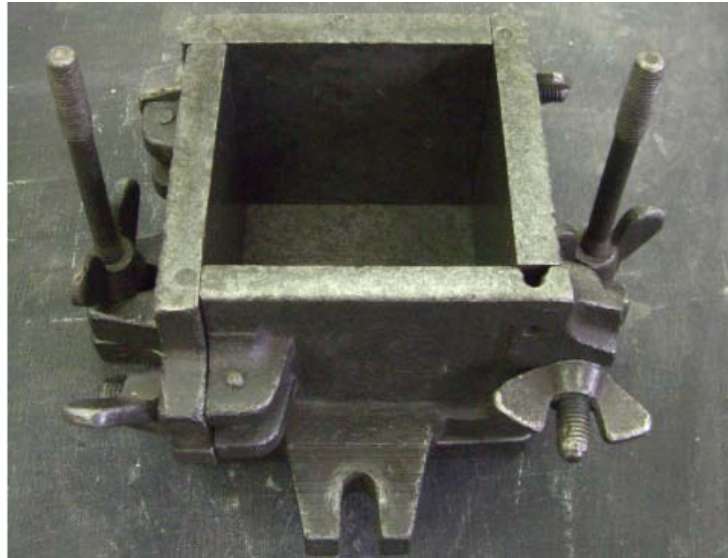


Abbildung 5.1: Gusschaltung der *Bauhaus Universität Weimar* zum Betonieren der Probekörper für die experimentellen Untersuchungen

Reinigung

Bevor die Abformlehren Gabbro, BSG und KNG bezüglich ihrer Oberflächenkennwerte R_a und R_z vermessen und für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt wurden, mussten deren Oberfläche gereinigt werden. Nur durch eine partikelfreie Oberflächen der Abformlehre konnte eine Verfälschung der Messergebnisse ausgeschlossen werden.

Die Reinigung der Abformlehren erfolgte mittels Spülmittel und Wasser. Diese war aber nicht ausreichend, um alle Verunreinigungen, vor allem Fette zu entfernen. Aus diesem Grund wurden die Oberflächen der Abformlehren in der Nasschemie des *Zentrum für Mikro- und Nanotechnologie (ZMN)* an der *Technischen Universität Ilmenau* gesäubert. Hierzu wurden diese mittels einer Lösemittelreinigung mit den Prozessmedien Aceton (C_3H_6O) und Isopropanol (C_3H_8O) durchgeführt. Die Abformlehren wurden zuerst mit Aceton, anschließend mit Isopropanol gespült und die restliche Flüssigkeit mit Stickstoff abgeblasen. Die KNG mussten wegen zu starken Verunreinigungen zusätzlich in einem Ammoniakbad für ca. 1 Stunde gereinigt werden. Die gereinigten Gläser und Gabbro wurden anschließend in Reinraumbtücher² verpackt und für den Transport in das Betonlabor in Folie eingeschweißt. Somit wurde eine Verschmutzung der gesäuberten Abformlehren bis zu deren Verwendung verhindert.

²Reinraumbtücher sind fusselfrei

5.2 Zugversuche

Der Haftverbund zwischen der Abformlehre und dem SVB wurde durch die Messung der Zugkraft mit der Universalprüfmaschine *TIRA test 28100* der Firma *TIRA GmbH* an der *Bauhaus Universität Weimar* durchgeführt. Hierzu wurde die Zugkraft mit der Universalprüfmaschine messtechnisch erfasst. Die *TIRA test 28100* hat eine maximale Zug- und Druckkraft von 100 kN. Die Aufnahme der Probekörper in die *TIRA test 28100* erfolgte über Zugstempel, welche an die Abformlehre und der SVB-Unterseite angeklebt wurden (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Universalprüfmaschine *TIRA test 28100* der *Bauhaus Universität Weimar* für die Haftverbunduntersuchungen mit eingespanntem Probekörper

Aufbringen der Zugstempel

Die Zugstempel aus Baustahl wurden vor dem Ankleben mittels Schleifpapier aufgeraut und anschließend mit Aceton gereinigt. Die Zugstempel wurden über einen Haftzugkleber *SILIKAL*[®] RI/21 der Firma *Silikal GmbH* an der Abformlehre und dem SVB befestigt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5.3: (a) Auftragen des Haftzugklebers auf den Zugstempel, (b) Andrücken des Zugstempels auf den Probekörper und (c) Probekörper mit angeklebten Zugstempeln an beiden Seiten

SILIKAL[®] RI/21 ist ein schnellhärtender Zweikomponentenkleber auf Methacrylatbasis. Er wurde speziell für die Verklebung von Stahl auf Betonuntergründen entwickelt. Die Kleberkomponente wurde mit 5 Gew.-% Härterpulver gründlich vermischt und auf den zu verklebenden Untergrund in 1-2 mm Schichtdicke aufgetragen (siehe Abbildung 5.3).

Messung der Zugkraft

Die Messung der Zugkraft wurde durch den verantwortlichen Mitarbeiter der *Bauhaus Universität Weimar* durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 5 mm/min und die Zugspannung stieg dabei um 100 N/s. Das Versuchsendkriterium war das Erreichen der maximalen Zugkraft von 100 kN oder das Lösen des Haftverbundes zwischen Zugstempel-Abformlehre-SVB. Die Messergebnisse sind in Abschnitt 5.3.1 und 5.3.3 dargestellt.

5.3 Auswertung der Messergebnisse zum Haftverbund

5.3.1 Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

Die Kennwerte für die gemessene Zugfestigkeit zwischen den Abformlehren und dem SVB sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Übersicht der messtechnisch erfassten Zugfestigkeiten zwischen den Abformlehren und dem SVB der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

Abform- masse	Abformlehre	Alter der Probe [Tage]	Zugfestigkeit [N/mm ²]			Mittelwert
			1	2	3	
SVB	Gabbro	2*	0***	0***	0,07	0,02
		7***	0	0	0	0
	BSG	1**	> 0,12	> 0,12	> 0,12	> 0,12
		7	0,01	0***	1,27	0,43
	KNG	1**	> 0,12	> 0,12	> 0,12	> 0,12
		7***	0	0	0	0

* Prüfung nach Tag 1 war aufgrund eines technischen Defektes der Prüfmaschine nicht möglich

** Haftzugkleber hat sich vom SVB gelöst

*** Lösen von Abformlehre und SVB durch Handkraft

Gabbro mit SVB

Bei der Variante Gabbro - SVB konnte nach zwei³ und sieben Tagen nach der Herstellung der SVB-Probekörper nur an einem der sechs Probekörper die Zugfestigkeit messtechnisch erfasst werden. Bei dem dritten Probekörper wurde nach zwei Tagen eine Zugfestigkeit von 0,07 N/mm² ermittelt, nachdem sich die zwei weiteren Probekörper nach dem Einspannen in die *TIRA test 28100* unter dem Eigengewicht des SVB lösten. Nach sieben Tagen der Feuchtlagerung konnten der SVB und der Gabbro mittels gegenseitiges Verdrehen durch Handkraft voneinander getrennt werden.

Kalk-Natron-Glas und Borosilicatglas mit SVB

Bei der Variante Glas - SVB konnte nach dem Entschalen (Tag eins) die Zugfestigkeit nicht direkt bestimmt werden. Es löste sich bei allen sechs Probekörpern der Zugstempel vom SVB bei einer Zugspannung von $\geq 0,12$ N/mm². Die Ursache für das Lösen der Zugstempel kann in der noch feuchten SVB-Oberfläche gesehen werden, wodurch der Haftzugkleber keine Verbindung mit dem SVB eingehen konnte. Aus diesem Grund konnten keine direkten Aussagen zum

³Die Messung der Zugkraft konnte nicht im Alter von einem Tag, aufgrund eines technischen defektes an der *TIRA test 28100*, durchgeführt werden.

Haftverbund getroffen werden. Es wurde nur deutlich, dass die Verbindung Glas-SVB einer Zugspannung von $\geq 0,12 \text{ N/mm}^2$ standhält. Wird dieser Kennwert auf die komplette Oberfläche ($A = 100 \text{ cm}^2$) skaliert, ist trotz einer Zugkraft von 1200 N keine Trennung möglich. Anhand der gemessenen Kennwerte aus Tabelle 5.1 sollte eine Trennung von Abformlehre (BSG und KNG) und dem SVB nach einem Tag (nach der Herstellung) nicht durchgeführt werden.

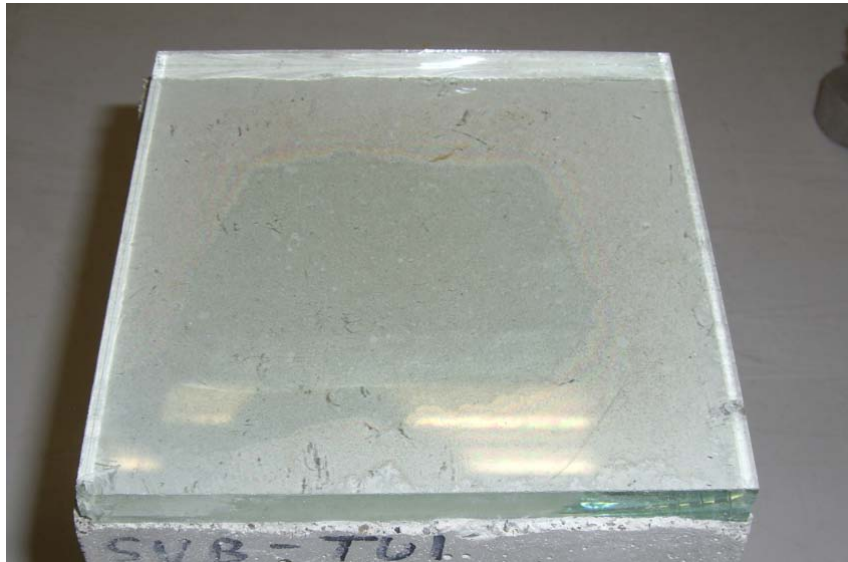


Abbildung 5.4: Lufteinschluss zwischen den Grenzflächen der Abformlehre Kalk-Natron-Glas und dem SVB im Probenalter von sieben Tagen

Die gemessene Zugfestigkeit der Probekörper im Alter von sieben Tagen schwankt zwischen beiden Glasarten. Bei der Variante KNG-SVB konnten die Probekörper wie oben beschrieben voneinander gelöst werden. Eine mittig angeordnete Luftblase deutete an, dass es im Zentrum der Probekörper keinen Kontakt mehr zwischen der Abformlehre und dem SVB gab (siehe Abbildung 5.4). Im Gegensatz dazu wurde bei der Variante BSG-SVB eine Zugfestigkeit von $0,01 \text{ N/mm}^2$ und $1,27 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Beim dritten Probekörper konnten die Elemente wiederum durch Handkraft gelöst werden.

5.3.2 Auftragen der Trennmittel auf die Abformlehren

In der zweiten Versuchsreihe wurden auf die Oberflächen der Abformlehren Trennmittel aufgetragen. Mit Hilfe der Trennmittel sollte der direkte Kontakt des flüssigen SVB beim Gießen auf die Abformlehre verhindert und somit eine Verringerung des Haftverbundes erreicht werden. Die Oberflächen der Abformlehren wurden mit PTFE-Spray, Resist und Aquapel beschichtet. Weiterhin wurde der Versuch unternommen, mittels Wachspolitur die Krater in der Oberfläche des Gabbro zu versiegeln. Bei der Beurteilung der abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro (siehe Abschnitt 5.4.2) wurde festgestellt, dass die komplette SVB-Oberfläche mit feinen Spitzen überzogen ist. Daraus ist zu schlussfolgern, dass der flüssige SVB die Krater

beim Betonieren ausfüllt und beim Entschalen abformt. Eine Übersicht der Versuche ist in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Übersicht der eingesetzten Stoffe, die auf der Oberfläche der Abformlehren als Trennschicht fungieren

Trennmittel	PTFE-Spray	Resist	Aquapel	Wachs
Gabbro	X	-	-	X
Borosilicatglas	X	X	X	-
Kalk-Natron-Glas	X	X	X	-

Der Einsatz von Stoffen als Trennmittel auf den Oberflächen der Abformlehren ist an bestimmte Forderungen geknüpft. Diese Stoffe dürfen die Gestaltabweichungen der Oberfläche nicht negativ beeinflussen. Dies bedeutet, dass die Rauheit, Welligkeit und Ebenheit der Trennmitteloberfläche gleich der Abformlehren sein muss. Hieraus ergeben sich folgende Forderungen:

- *konstante Schichtdicke*
Um die Gestaltabweichungen der 1. Ordnung (Formabweichung) und 2. Ordnung (Welligkeit) der Abformlehre nicht zu verschlechtern, muss das Trennmittel mit einer konstanten Schichtdicke aufgetragen werden. Unebenheiten in der abgeformten SVB-Oberfläche verursachen eine Abweichung der aerostatischen Führung von ihrer idealen Leitgerade.
- *identische Rauheit*
Nach der Beschichtung der Oberfläche der Abformlehre muss die Trennschicht mindestens die gleichen Oberflächenkennwerte (Mittenrauwert R_a und gemittelte Rautiefe R_z) aufweisen wie zuvor.
- *chemische Beständigkeit*
Das aufgetragene Trennmittel darf durch den Kontakt mit dem flüssigen SVB nicht zersetzt werden. Eine mögliche chemische Reaktion zwischen SVB und Trennschicht können die Gestaltabweichungen (Formabweichung, Welligkeit, Rauheit) der abgeformten SVB-Oberfläche negativ beeinflussen.
- *gute Haftung*
Eine hoher Bedeckungsgrad und eine hohe Haftung auf der Oberfläche der Abformlehre ist notwendig, um ein Ablösen der Trennschicht nach dem Abformen zu verhindern. Ein teilweises Ablösen der Trennschicht würde zu Unebenheiten auf der SVB-Oberfläche führen.

Die aufgelisteten Forderungen an die zum Einsatz kommenden Trennmittel wurden in dieser Arbeit nicht überprüft. Diese Versuchsreihe soll lediglich zeigen, mit welchem Trennmittel der kleinste Haftverbund zwischen Abformlehre und SVB möglich ist. Die eingesetzten Trennmittel wurden anhand der gestellten Forderungen ausgewählt.

PTFE - Spray

PTFE⁴-Spray ist ein Trennmittel für Werkstoffe auf der Basis von Silikonöl und Teflonpulver. PTFE - Spray ist gekennzeichnet durch:

- chemische Beständigkeit
- gute Haftung

Die Oberflächen der Abformlehren wurden gesäubert und getrocknet. Im Abstand von ca. 20 cm wurde die Abformlehre mit PTFE besprüht.

Resist

Resiste (Fotolacke) werden in der Mikrotechnik zur Strukturierung (Lithographie) von Substraten eingesetzt. Bei einem Resist handelt es sich um ein Mehrkomponenten-System, welches in der Mikrotechnik eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen muss. Anforderungen, die für den Einsatz als Trennmittel auf KNG und BSG sprechen, sind:

- Kompatibilität mit verschiedenen Substraten (z. B. SiO_2 , Metall, Glas)
- gute Haftung
- Ätzbeständigkeit
- leichte Entfernbarkeit
- Auftrag mit konstanter Schichtdicke (wenige Mikrometer)

Die Beschichtung der Gläser (KNG und BSG) wurde im *Zentrum für Mikro- und Nanotechnologie der Technischen Universität Ilmenau* durchgeführt. Hierzu wurde ein Resist AZ 1518 der Firma *MicroChemicals GmbH* verwendet und mittels *Spin Coating* auf dem Glas aufgebracht. Die Zahl 18 in der Produktbezeichnung legt fest, dass das Resist mit einer Schichtdicke von 1,8 µm auf das Substrat (in diesem Fall auf die Abformlehre) aufgetragen wird.

Aquapel

Aquapel der Firma *Aquapel® Glass Treatment* ist ein wasserabweisendes Gel, welches am Glas eine Haftung durch chemische Bindung eingeht. Aquapel vergrößert den Kontaktwinkel des auftreffenden Wassers und bewirkt somit ein Abperlen des Wassers von der Glasoberfläche. Die Gläser wurden vor der Beschichtung mittels handelsüblichem Fensterreiniger gesäubert und getrocknet. Aquapel wurde durch kreisende Bewegungen auf der Abformlehre aufgetragen.

Wachspolitur

Als Wachspolitur wurde *SONAX Extreme Polish Wax 2 NanoPro* der Firma *SONAX GmbH* verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Politur für Autolacke. Auf die Oberfläche des

⁴PTFE (Polytetrafluorethylen) bekannt unter dem Handelsnamen Teflon, ist ein thermoplastischer Kunststoff.

Gabbro wurden wenige Milliliter von *SONAX Extreme Polish Wax 2 NanoPro* aufgetragen und mittels eines Poliertuchs verteilt.

5.3.3 Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)

Zwischen den beschichteten Abformlehren und dem SVB konnte nach einem Tag der Haftverbund nicht messtechnisch erfasst werden. Beim Entschalen wurden zwischen den Grenzschichten des SVB und den Abformlehren aus BSG und KNG Newtonsche Ringe⁵ festgestellt. Dies deutete darauf hin, dass sich zwischen der Abformlehre und dem SVB ein dünner Luftspalt befindet, womit ein Kontakt der beiden Elemente ausgeschlossen wurde. Die Trennung von Abformlehre und SVB durch gegenseitiges Auseinanderziehen (vergleichbar mit den Zugversuch in der *TIRA test 28100*) war mittels Handkraft nicht möglich. Wurde allerdings jeweils eine Ecke angehoben, war eine Trennung ohne großen Kraftaufwand möglich. Weiterhin konnten beide Elemente durch gegenseitiges Abscheren voneinander getrennt werden. Daraus ist zu schlussfolgern, dass durch den Einsatz von Trennmitteln in Form von PTFE-Spray, Aquapel, Resist und Wachspolitur der Haftverbund zwischen den Abformlehren und dem SVB, im Vergleich zur Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel), verringert wurde.

5.4 Oberflächenanalyse der abgeformten SVB-Oberflächen

In diesem Abschnitt werden die abgeformten SVB-Oberflächen messtechnisch erfasst. Hierzu werden die Oberflächenkennwerte R_a (Mittenrauwert) und R_z (gemittelte Rautiefe) gemessen und mit denen der eingesetzten Abformlehren verglichen. Anhand der Oberflächenkennwerte und der Betrachtung der Oberflächenprofile werden die SVB-Oberflächen hinsichtlich ihrer Eignung als Führungsfläche für aerostatische Führungen beurteilt.

Vor der Oberflächenanalyse werden die abgeformten SVB-Oberflächen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) subjektiv mit dem Auge (optisch) und den Fingern (taktil) beurteilt. Das Ziel ist es festzustellen, inwiefern sich die abgeformten SVB-Oberflächen abhängig von der Abformlehre und auch innerhalb der Probekörper selbst unterscheiden. Das Hauptaugenmerk soll dabei auf der erzielten Qualität der Oberfläche liegen. Aufbauend auf dieser Beurteilung wird die Anzahl der Probekörper festgelegt, die je Abformlehre messtechnisch untersucht werden.

⁵Newtonsche Ringe entstehen, wenn Licht interferiert, das von der Vorder- und Rückseite einer dünnen Luftschicht reflektiert wird, die zwischen einer ebenen und einer sphärisch gekrümmten Glasfläche eingeschlossen ist.

5.4.1 Verwertbarkeit der Oberflächenkennwerte

Anhand des Vergleichs der Oberflächenkennwerte R_a und R_z der Abformlehren und der darauf abgeformten SVB-Probekörper können Aussagen zur Abformgenauigkeit getroffen werden. Je besser die Abformung, desto kleiner wird die Differenz zwischen den Oberflächenkennwerten R_a und R_z der Abformlehre und der SVB-Probekörper. Für Aussagen über die Schwankung der Abformgenauigkeit zwischen den drei abgeformten SVB-Oberflächen je Abformlehre können ebenfalls die Oberflächenkennwerte R_a und R_z zur Beurteilung herangezogen werden.

Schwieriger ist die Aussagekraft von R_a und R_z zur Beurteilung der abgeformten SVB-Oberflächen hinsichtlich ihrer Eignung als Führungsflächen für aerostatische Führungen. Als Gestellwerkstoffe für MPG mit aerostatischen Führungen werden Granit, Aluminium, Gusseisen, Glas und Stahl eingesetzt. Mit Ausnahme von Granit und Glas werden die Gestelle bzw. Führungselemente⁶ durch das Urformenverfahren Gießen hergestellt. Bei diesem Fertigungsverfahren werden die geforderten Oberflächenparameter Ebenheit und Rauheit der Führungsfläche (siehe [New09a, Bar82, Kra93]) nicht erfüllt. Mittels subtraktiver Verfahren (Läppen, Schleifen, Polieren) werden die geforderten Oberflächenparameter der Führungsflächen erreicht. Durch die spanende Bearbeitung werden auf der Führungsfläche befindliche Unebenheiten (Spitzen) abgetragen. Dies lässt vermuten, dass die Hersteller von Luftlagerelementen ihre Angaben für den Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z auf Führungsflächen beziehen, die durch subtraktive Verfahren geschaffen wurden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es Führungsflächen für aerostatische Führungen durch das *direkt Abformen* von SVB zu schaffen. Dies bedeutet, eine spanende Nachbearbeitung soll vermieden werden. Im Idealfall werden durch das *direkte Abformen* alle Gestaltabweichungen der eingesetzten Abformlehre als Negativ auf der SVB-Oberfläche abgeformt. Die auf der Oberfläche befindlichen Krater und Spitzen beeinflussen die Oberflächenkennwerte R_a und R_z negativ und sprechen damit gegen den Einsatz als Führungsfläche. Krater in der Führungsfläche sind für das Luftlagerelement in der Regel weniger problematisch, können jedoch die Tragfähigkeit des Luftlagerelementes beeinflussen. Spitzen, welche, bezogen auf die Fläche, unter dem Luftlagerelement höher als die Spalthöhe h herausragen, können das Luftlagerelement beschädigen. Eine Spalthöhe h von ca. 5 μm hat sich bei den Herstellern von Luftlagerelementen als guter Kompromiss erwiesen. Aufgrund fehlender Angaben bzw. Richtlinien über das zulässige Verhältnis von Spitzenhöhe zu Spalthöhe h ist es nicht möglich, die Auswirkung auf das Luftlagerelement zu beschreiben. Hierzu sind separate Versuche notwendig, was jedoch nicht Ziel dieser Arbeit ist.

⁶oder Support (siehe Abbildung 1.3)

Im Rahmen dieser Arbeit wird definiert, dass die Spitzen bei einem Luftspalt von $h = 5 \mu\text{m}$ maximal $h/2 = 2,5 \mu\text{m}$ ⁷ betragen dürfen. Dies bedeutet, dass Spitzen über $2,5 \mu\text{m}$ nicht zulässig sind, wobei die Tiefe der Krater für die Beurteilung keine Rolle spielt. Aus diesem Grund wird die mittlere Rautiefe R_0 ⁸ definiert als Mittelwert aus der höchsten Spitze⁹ und dem tiefsten Krater¹⁰ im erstellen Oberflächenprofil einer beliebigen Messstrecke l_n .

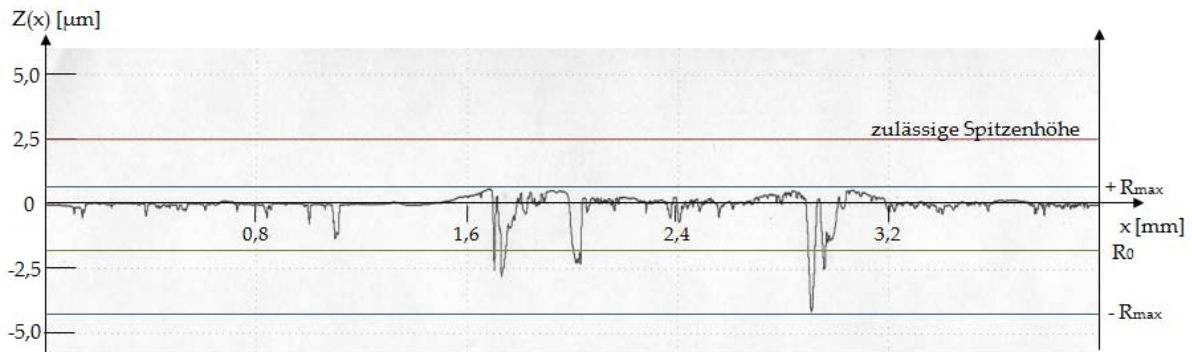


Abbildung 5.5: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,245 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,24 \mu\text{m}$ der eingesetzten Abformlehre aus Gabbro „Nero Impala“ mit eingezeichneter mittlerer Rautiefe R_0 und der zulässigen Spitzenhöhe von $2,5 \mu\text{m}$

Hiermit ist es theoretisch möglich, den Einfluss der Kratertiefe auf R_a und R_z zu verdeutlichen (siehe Abbildung 5.5). Liegt die mittlere Rautiefe R_0 unterhalb der Mittellinie des Oberflächenprofils, so wird angenommen, dass die Oberflächenkennwerte R_a und R_z vorwiegend durch die Krater in der Oberfläche beeinflusst werden.

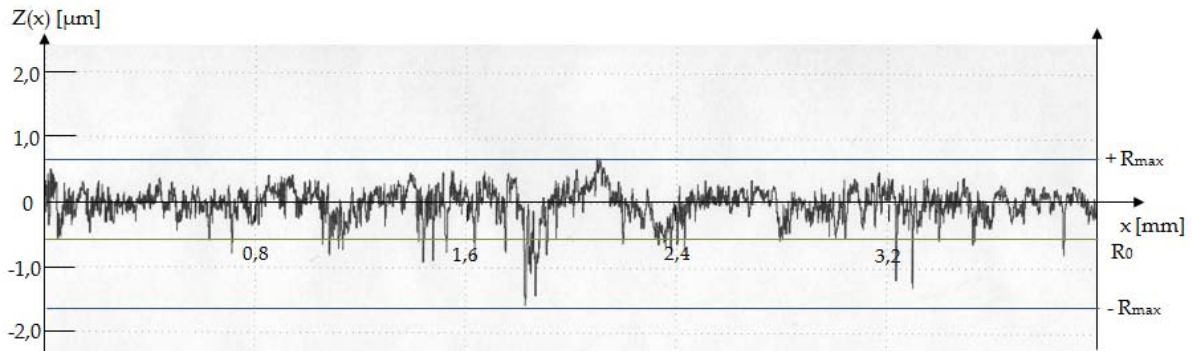


Abbildung 5.6: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,188 \mu\text{m}$ und $R_z = 1,59 \mu\text{m}$ der eingesetzten Abformlehre aus Gabbro mit eingezeichneter mittlerer Rautiefe R_0 und der zulässigen Spitzenhöhe von $2,5 \mu\text{m}$

⁷Hierbei handelt es sich um einen willkürlich festgelegten Wert in dieser Arbeit zur Beurteilung der Eignung der SVB-Oberflächen als Luftführungsfläche.

⁸Bezeichnung der mittleren Rautiefe R_0 in den Oberflächenprofilen mit R_0 .

⁹Bezeichnung in den Oberflächenprofilen mit $+R_{\text{max}}$.

¹⁰Bezeichnung in den Oberflächenprofilen mit $-R_{\text{max}}$.

Mit Hilfe der Abbildungen 5.5 und 5.6 soll gezeigt werden, dass die hohen R_a - und R_z -Werte durch die in der Oberfläche befindlichen Krater hervorgerufen werden. Dies zeigt auch die eingezeichnete Rautiefe R_0 , welche unterhalb der Mittellinie des Oberflächenprofils liegt.

Weiterhin ist nicht bekannt, inwiefern die vorhandenen Spitzen das Luftlagerelement beim Aufsetzen (durch gewolltes Unterbrechen der Luftzufuhr) beschädigen. Aufgrund fehlender Kenntnisse können hierzu keine Angaben getroffen und dieser Aspekt für die Beurteilung der SVB-Oberflächen nicht berücksichtigt werden. Eine Nachbearbeitung der SVB-Oberfläche ist nur dann sinnvoll, wenn auf der Oberfläche vereinzelt feine Spitzen optisch, taktil oder messtechnisch erfassbar sind. Die Schwierigkeit besteht darin, nur die feinen Spitzen und nicht Teile der gesamten SVB-Oberfläche abzutragen.

5.4.2 Beurteilen der SVB-Oberflächen - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

SVB abgeformt auf Gabbro

Beim optischen Vergleich der sechs SVB-Oberflächen nach dem Abformen im Alter von zwei und sieben Tagen konnten nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden. Durch in Augenscheinnahme der SVB-Oberfläche wird festgestellt, dass diese glatt ist und ebenfalls leicht spiegelt. Auf der SVB-Oberfläche sind keine Risse feststellbar.

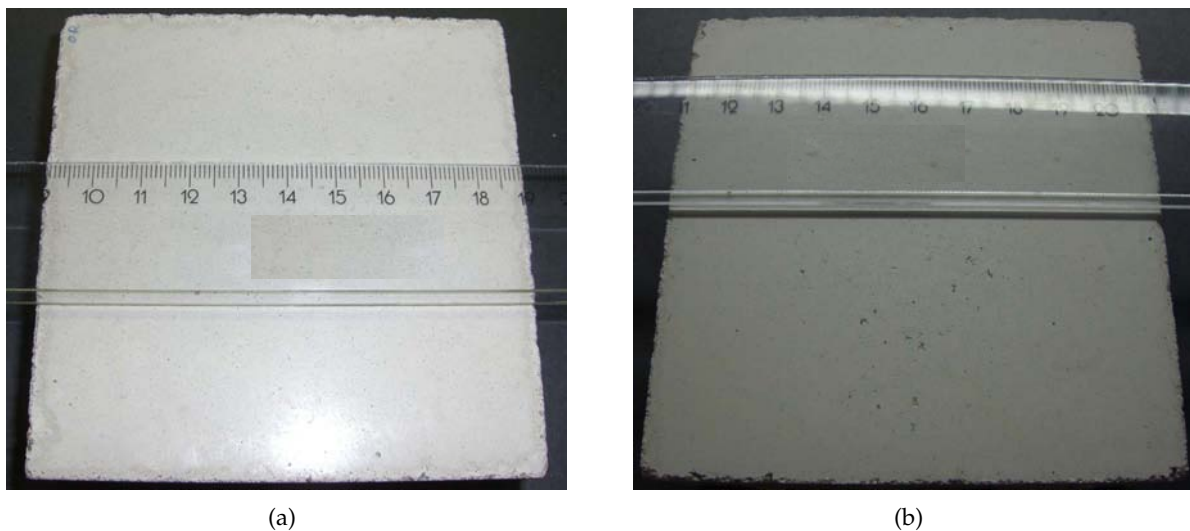


Abbildung 5.7: Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro „Nero Impala“. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von (a) zwei Tagen und (b) sieben Tagen

Am Randbereich sind vermehrt Lufteinschlüsse mit einem Durchmesser von bis zu 1 mm sichtbar (siehe Abbildung 5.7). Die Kanten sind vollständig gebrochen, was durch die Anordnung

von Schalung und Abformlehre verursacht wurde. Die Kantenlänge der Abformlehre war geringfügig kleiner als die der eingesetzten Schalung, wodurch flüssiger SVB an den Kanten der Abformlehre herunterlief und beim Entschalen an den Kanten abplatzte.

Bei der taktilen Wahrnehmung wurden auf der kompletten SVB-Oberfläche vermehrt Spitzen wahrgenommen. Daraus ist zu schlussfolgern, dass beim Betonieren der flüssige SVB die Krater in der Oberfläche des Gabbro ausfüllt und abformt.

SVB abgeformt auf Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas

Beim optischen Vergleich der abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG im Alter von sieben Tagen konnten ebenfalls keine Unterschiede festgestellt werden. Die SVB-Oberflächen sind glatt, so dass diese leicht spiegeln. Über den ganzen Oberfläche sind keine Risse, aber Lufteinschlüsse mit einem Durchmesser von bis zu 3 mm (siehe Abbildung 5.8) verteilt.

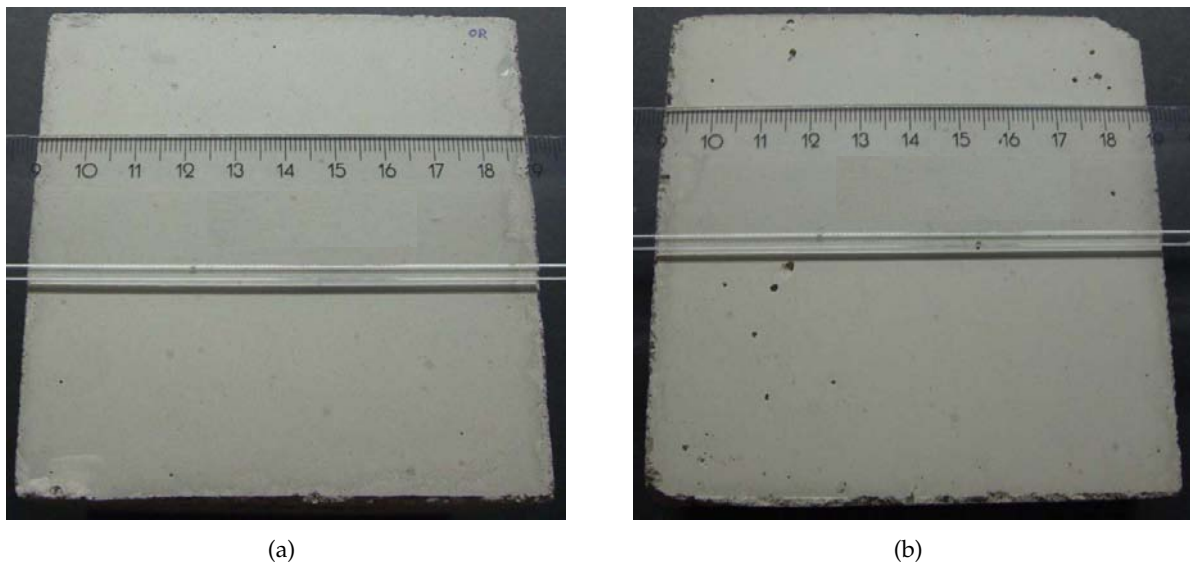


Abbildung 5.8: Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf (a) Borosilicatglas und (b) Kalk-Natron-Glas. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von sieben Tagen.

Bei der taktilen Beurteilung der abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG konnten ebenfalls keine Unterschiede festgestellt werden. Die SVB-Oberflächen sind glatt und optisch wie taktil ohne Unebenheiten.

5.4.3 Auswertung der Messergebnisse - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

Anhand der optischen und taktilen Beurteilung wurde festgestellt, dass bei jeder Abformung auf der gleichen Abformlehre identische Oberflächen, unabhängig von der Kontaktzeit, entstanden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden jeweils nur zwei abgeformte SVB-Oberflächen je Abformlehre untersucht. Untersucht wurden:

- eine SVB-Oberfläche (abgeformt auf Gabbro) im Alter von zwei Tagen
- eine SVB-Oberfläche (abgeformt auf Gabbro) im Alter von sieben Tagen
- zwei SVB-Oberflächen (abgeformt auf KNG) im Alter von sieben Tagen
- zwei SVB-Oberflächen (abgeformt auf BSG) im Alter von sieben Tagen

Tabelle 5.3 und Abbildung 5.9 stellen die gemessenen Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen im Vergleich mit den Abformlehren dar.

Tabelle 5.3: Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der eingesetzten Abformlehren

	Alter der Probe [Tage]	Mittenrauwert R_a [μm]	gemittelte Rautiefe R_z [μm]
Abformlehre			
Gabbro		0,156	1,998
Kalk-Natron-Glas	-	0,011	0,088
Borosilicatglas		0,011	0,084
SVB abgeformt auf			
Gabbro	2	0,505	3,366
	7	0,470	4,326
Kalk-Natron-Glas	7 (Nr. 1)	0,204	2,019
	7 (Nr. 2)	0,245	2,352
Borosilicatglas	7 (Nr. 1)	0,193	2,162
	7 (Nr. 2)	0,202	2,239

SVB abgeformt auf Gabbro

Aus Tabelle 5.3 wird deutlich, dass die abgeformten SVB-Oberflächen im Alter von zwei und sieben Tagen identische Oberflächenkennwerte aufweisen. Die messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a weichen um rund drei Hundertstel Mikrometer voneinander ab. Die gemittelte Rautiefe R_z streut bei den SVB-Oberflächen um einen Mikrometer.

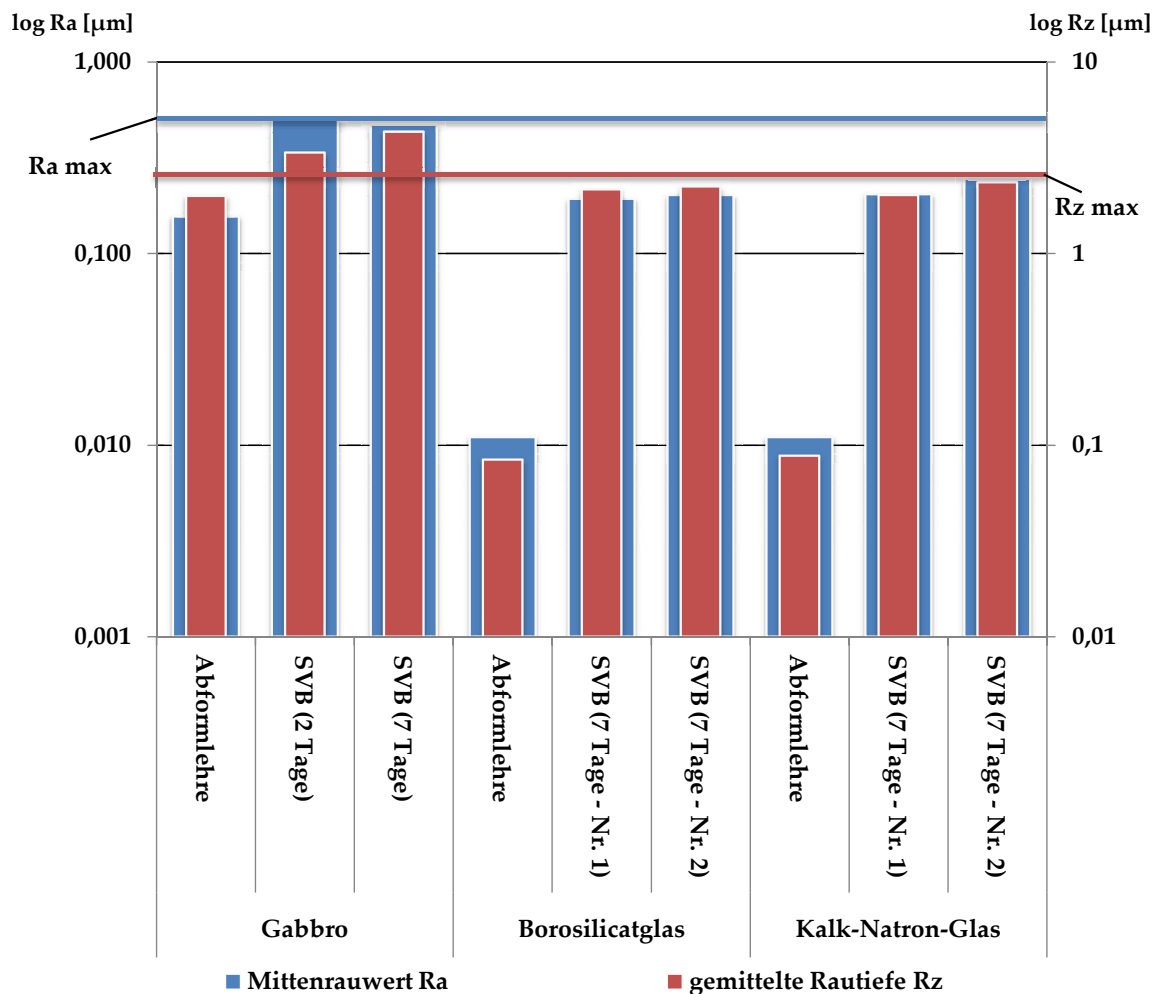


Abbildung 5.9: Graphischer Vergleich der Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen und der eingesetzten Abformlehren mit Markierung für die zulässigen Grenzen des Luftlagerelementes

Die Streuung der gemittelten Rautiefe R_z ¹¹ wurde sowohl durch vereinzelte Spitzen und als auch Krater in der gleichen Größenordnung (siehe Abbildung 5.11) verursacht. Obwohl die Oberflächenkennwerte von zwei SVB-Oberflächen messtechnisch erfasst wurden und sich die weiteren abgeformten SVB-Oberflächen sowohl optisch und taktil kaum voneinander unterscheiden, kann zusammenfassend gesagt werden, dass die Kontaktzeit zwischen SVB und dem Gabbro keinen Einfluss auf die Oberflächenkennwerte R_a und R_z hat.

Der Vergleich mit der eingesetzten Abformlehre zeigt, dass die Oberflächenkennwerte der SVB-Oberfläche größer sind (siehe Tabelle 5.3). Wie bereits vor dem Betonieren vermutet wurde, füllt der flüssige SVB die Krater in der Oberfläche des Gabbros aus und formt diese beim Erhärten ab. Die feinen Spitzen auf den abgeformten SVB-Oberflächen können eine Ursache

¹¹Die gemittelte Rautiefe R_z ist als arithmetischer Mittelwert der Einzelrautiefen fünf aufeinander folgender Einzelmessstrecken l_r definiert. Die Einzelrautiefe R_{zj} ist definiert als die Summe aus der größten Profilschärpe und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb der Einzelmessstrecke l_r [DIN EN ISO 4287].

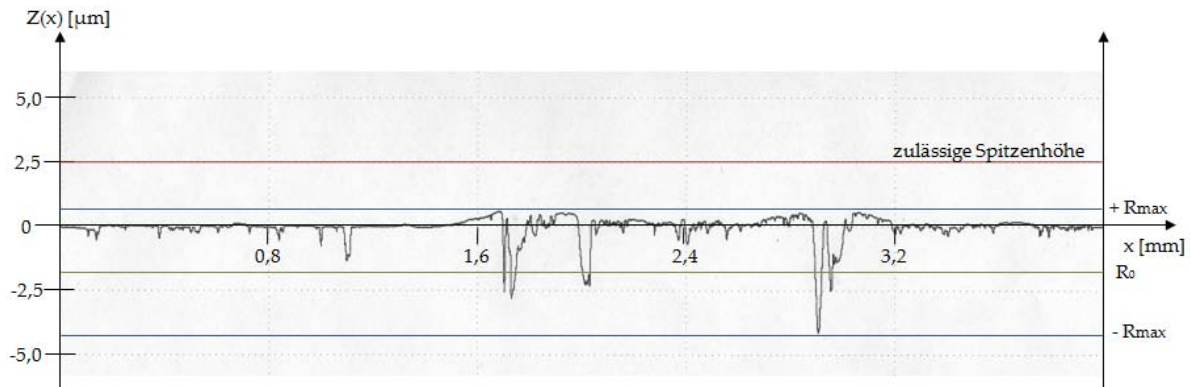


Abbildung 5.10: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,188$ μm und $R_z = 1,59$ μm der eingesetzten Abformlehre Gabbro „Nero Impala“, erstellt mit dem Perthometer M1

für die Streuung der Oberflächenkennwerte R_a und R_z im Vergleich zur Abformlehre sein. Die Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen die Oberflächenprofile der Abformlehre Gabbro und einer abgeformten SVB-Oberfläche im Alter von zwei Tagen.

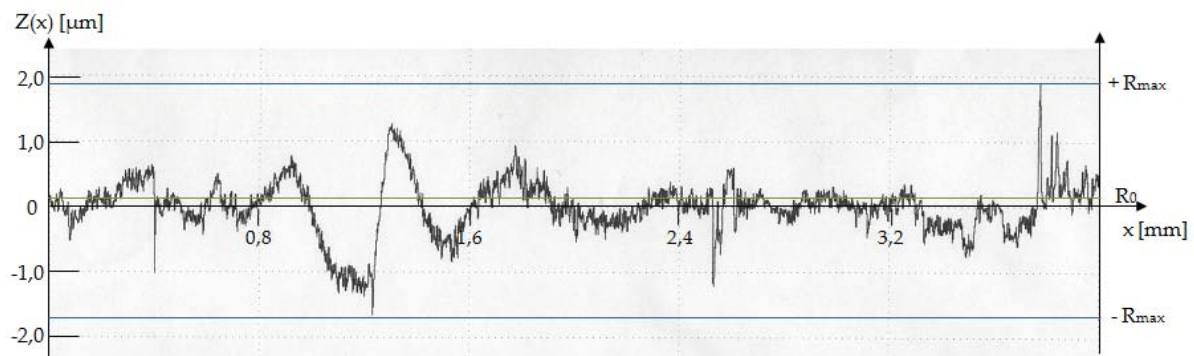


Abbildung 5.11: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,290$ μm und $R_z = 2,12$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Der Mittenrauwert R_a und die gemittelte R_z sprechen im Vergleich mit Herstellerangaben gegen den Einsatz als Führungsfläche. Wie aus dem erstellten Oberflächenprofil deutlich wird, sind auf der SVB-Oberfläche vereinzelt feine, dünne Spitzen mit einer Höhe von bis zu 2 μm vorhanden. Diese liegen unterhalb der zulässigen Spitzenhöhe und können somit trotzdem als Führungsflächen eingesetzt werden.

SVB abgeformt auf Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas

Die auf Glas (BSG und KNG) abgeformten SVB-Oberflächen im Alter von sieben Tagen weisen untereinander identische Oberflächenkennwerte auf (siehe Tabelle 5.3). Der Mittenrauwert R_a der abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG streut um rund ein Hundertstel Mikrometer. Die Streuung bei der gemittelten Rautiefe R_z liegt im Bereich von $0,1 \mu\text{m}$. Die identischen Oberflächenkennwerte von $R_a = 0,22 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,2 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberflächen innerhalb der Glasarten lassen vermuten, dass die erzielten Kennwerte für die Rauheit beim *direkten Abformen* auf Glas in dieser Größenordnung liegen.

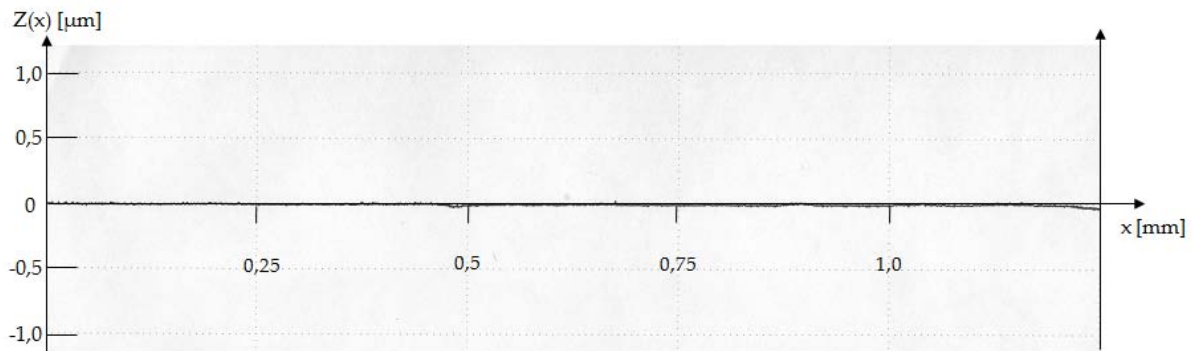


Abbildung 5.12: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 1,25 \text{ mm}$ mit $R_a = 6 \text{ nm}$ und $R_z = 50 \text{ nm}$ der eingesetzten Abformlehre Borosilicatglas, erstellt mit dem Perthometer M1

Aufgrund fehlender SVB-Oberflächen im Alter von einem Tag kann der Einfluss der Kontaktzeit zwischen Abformlehre und SVB in diesem Fall nicht abgeschätzt werden. Die Oberflächenkennwerte R_a und R_z der abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG sind im Vergleich zu den Abformlehren (siehe Abbildung 5.12) um ein Vielfaches größer. Der Mittenrauwert R_a ist in diesem Fall ca. um den Faktor 20 und die gemittelte Rautiefe R_z ist um zwei Mikrometer größer.

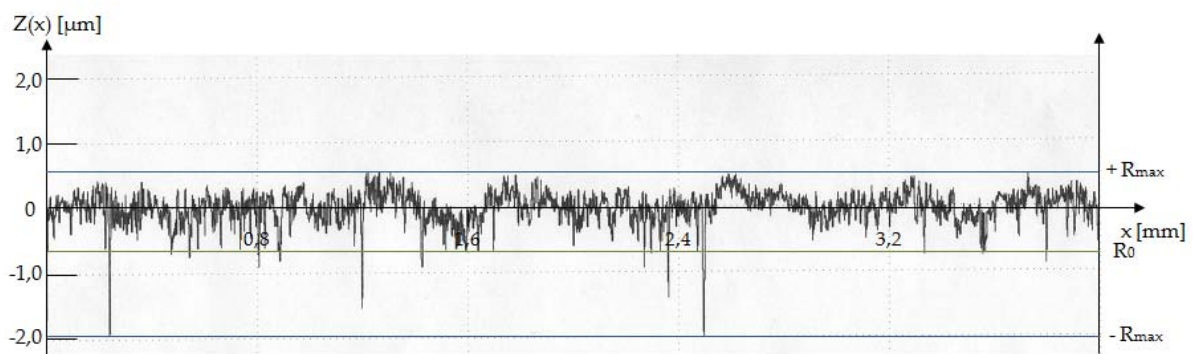


Abbildung 5.13: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,183 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,05 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas (Nr. 1), erstellt mit dem Perthometer M1

Bei der Betrachtung des Oberflächenprofils (siehe Abbildung 5.13 und 5.14) wird deutlich, dass die hohen Oberflächenkennwerte, im Vergleich zur Abformlehre (siehe Abbildung 5.12), vorwiegend durch Krater mit einer Tiefe von bis zu $2\text{ }\mu\text{m}$ hervorgerufen werden. Dieser Aspekt wird auch durch die Lage der mittlere Rautiefe R_0 gegenüber der Mittellinie des Oberflächenprofils verdeutlicht.

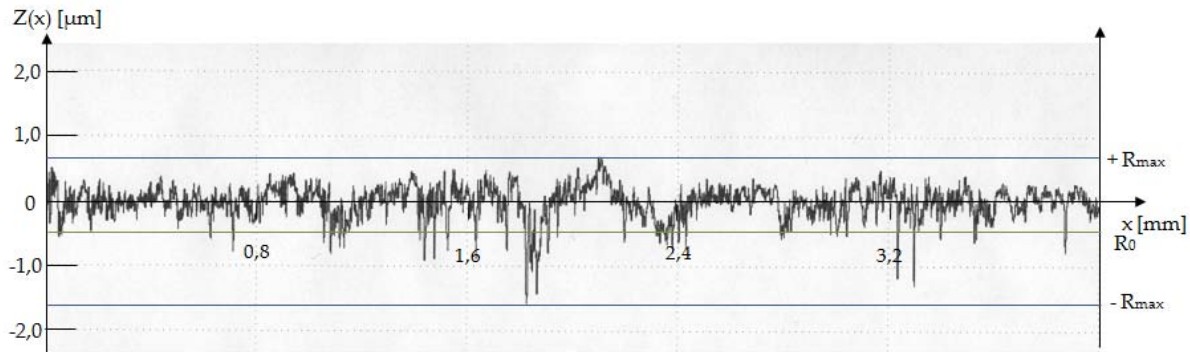


Abbildung 5.14: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6\text{ mm}$ mit $R_a = 0,188\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 1,59\text{ }\mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas (Nr. 1), erstellt mit dem *Perthometer M1*

Die bei dieser Variante geschaffenen SVB-Oberflächen sind aufgrund des Mittenrauwert von rund $R_a = 0,22\text{ }\mu\text{m}$ und der gemittelter Rautiefe von $R_z = 2,2\text{ }\mu\text{m}$ als Führungsflächen geeignet. Weiterhin wird an den erstellten Oberflächenprofilen einer beliebig gewählten Messstrecke l_n deutlich, dass die auf der Oberfläche befindliche Spitzen eine maximale Höhe von ca. 500 nm haben und mit Sicherheit keinen Einfluss auf die Funktionalität des Luftlagerelementes nehmen.

5.4.4 Nachbearbeitung - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

Nach dem Abformen von SVB auf Gabbro wurden auf der SVB-Oberfläche vermehrt kleine Spitzen taktil wahrgenommen. Auch die erstellten Oberflächenprofile (siehe Abbildung 5.11) mit dem *Perthometer M1* deuteten auf das Vorhandensein von feinen, dünnen Spitzen hin. Aus diesem Grund wurde der Versuch unternommen, durch ein nachträgliches Abtragen der Spitzen die Oberflächenkennwerte R_a und R_z zu verbessern. Dazu wurde das Läppen und das Polieren als mögliche Nachbearbeitungsverfahren gegenüber gestellt, in dem zur Abtragung der Spitzen jeweils eine der SVB-Oberflächen geläppt und die andere poliert wurde. Anschließend wurden von beiden SVB-Oberflächen die Oberflächenkennwerte R_a und R_z erfasst. Aufgrund der, im Vergleich zur polierten SVB-Oberfläche schlechteren R_a - und R_z -Werte, wurde bei den SVB-Oberflächen der zweiten Messreihe (Trennung von Abformlehre und SVB im Alter von sieben Tagen) das Läppen nicht berücksichtigt. Im nachfolgenden werden die durchgeführten Nachbearbeitungsverfahren erläutert und die SVB-Oberflächen beurteilt.

Läppen

Das Läppen wurde in dem Fachgebiet *Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe* der *Technischen Universität Ilmenau* durchgeführt. Hierzu wurde ein Poliertuch DP-PAN von STRUERS GmbH verwendet. Als Schleifemulsion wurde *Dia Double Poly* 1 μm eingesetzt. Dabei handelt es sich um 100 % polykristalline Diamanten in einer Konzentration von 20 ct/L mit einem pH-Wert von $7 \pm 0,2$. Die SVB-Probe wurde zunächst in einem Ring aufgenommen, der beim Läppen dafür Sorge getragen hat, dass die SVB-Oberfläche gegenüber dem Poliertuch eine rotatorische Bewegung erfuhrt (siehe Abbildung 5.15(a)). Anschließend wurde die SVB-Oberfläche auf dem rotierende Poliertuch plziert und unter ständiger Zugabe der Schleifemulsion für rund 2 min geläppt.



(a)



(b)

Abbildung 5.15: (a) Läppen der abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro (Trennung im Alter von 2 Tagen) und (b) Polieren der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro (Trennung im Alter von 2 Tagen)

Polieren

Das Polieren der SVB-Oberfläche wurde per Hand, unter dem Einsatz einer Schleifscheibe, durchgeführt. Hierzu wurde eine Schleifscheibe *MICROCUT® SILICON CARBIDE P4000* der Firma *Buehler Ltd.* eingesetzt. Diese wurde mit leichtem Fingerdruck unter laufendem Wasser mit kreisenden Bewegungen über die SVB-Oberfläche geführt (siehe Abbildung 5.15(b)). Dieser Vorgang wurde so lange durchgeführt, bis taktil keine Unebenheiten mehr spürbar waren. Die im Anschluss an die Nachbearbeitungsverfahren messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte R_a und R_z sind in Tabelle 5.4 und Abbildung 5.16 gegenübergestellt.

Tabelle 5.4: Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) vor und nach deren Bearbeitung

	Alter der Probe [Tage]	Mittenrauwert R_a [μm]	gemittelte Rautiefe R_z [μm]
Abformlehre			
Gabbro	-	0,156	1,998
SVB-Oberfläche unbehandelt			
Gabbro	2	0,505	3,366
	7	0,470	4,326
SVB-Oberfläche nachbearbeitet			
Gabbro (Läppen)	2	0,583	5,146
Gabbro (Polieren)	2	0,201	2,282
	7	1,088	7,509

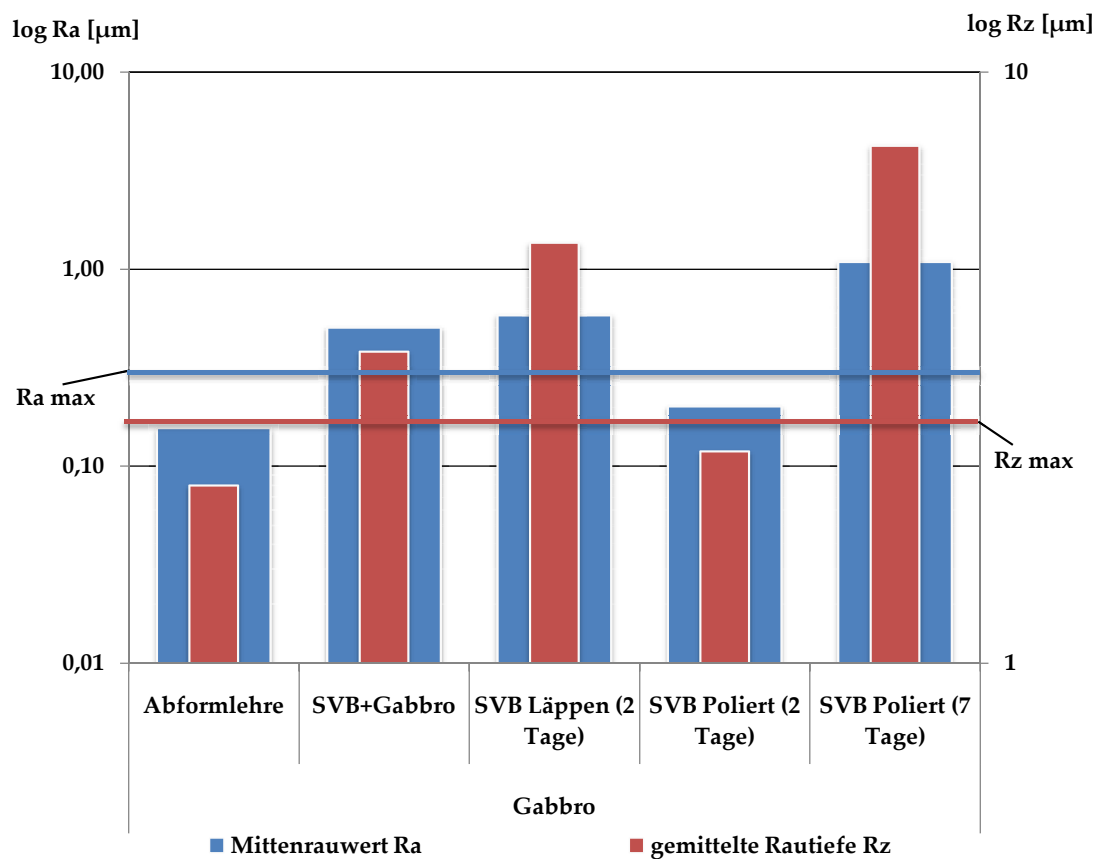


Abbildung 5.16: Graphischer Vergleich der Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefen R_z der nachbearbeiteten SVB-Oberflächen und der eingesetzten Abformlehre

SVB-Oberfläche geläppt

Bei der geläppten SVB-Oberfläche (Trennung im Alter von zwei Tagen) wurde der Mittenrauwert R_a geringfügig verändert. Die gemittelte Rautiefe R_z wurde um rund $2\text{ }\mu\text{m}$ verschlechtert. Die Ursache für den gestiegenen R_z -Wert kann durch die Anordnung von SVB-Probekörper und dem Poliertuch erklärt werden. Der SVB-Probekörper wurde mit der zu bearbeitenden Oberfläche auf das Poliertuch mit Schleifemulsion gelegt.

Beim Läppen brachen kleine SVB-Stücke von den Kanten ab, welche dann zwischen die SVB-Oberfläche und das Poliertuch wanderten und tiefere Schäden in der Oberfläche erzeugten als vorher. Anschließend wurden auf der SVB-Oberfläche kleine, dünne Riefen optisch und taktil wahrgenommen.

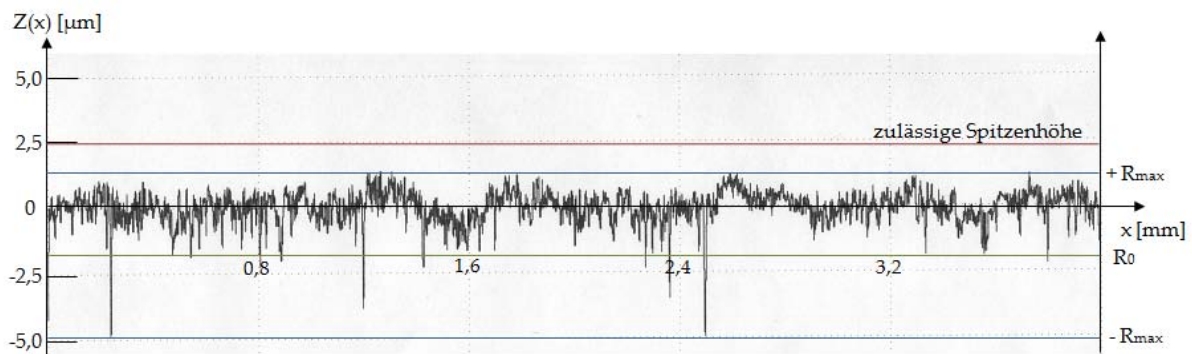


Abbildung 5.17: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6\text{ mm}$ mit $R_a = 0,456\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 4,10\text{ }\mu\text{m}$ der geläppten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Anhand des erstellten Oberflächenprofils (siehe Abbildung 5.17) und der darin eingezeichneten mittleren Rautiefe R_0 wird deutlich, dass Krater mit einer Tiefe von bis zu $5\text{ }\mu\text{m}$ für die gestiegenen Oberflächenkennwerte R_a und R_z verantwortlich sind. Die Oberflächenkennwerte R_a und R_z der geläppten SVB-Oberflächen sind um den Faktor 2 größer als die geforderten Kennwerte der Hersteller ($R_a < 0,4\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 1,5\text{...}2,5\text{ }\mu\text{m}$). Aufgrund der maximalen Spitzenhöhe von $1,7\text{ }\mu\text{m}$ ist die SVB-Oberfläche für den Einsatz als Führungsfläche geeignet.

SVB-Oberfläche poliert

Beim Polieren der SVB-Oberflächen, die im Alter von zwei und sieben Tagen von der Abformlehre getrennt wurden, streuten die Oberflächenkennwerte R_a und R_z in zwei Richtungen. An dem Probekörper, der im Alter von zwei Tagen von der Abformlehre getrennt wurde, trat der erhoffte Effekt ein, dass die auf der SVB-Oberfläche befindlichen feinen, dünnen Spitzen durch das Polieren abgetragen wurden.

Dies wurde auch daran deutlich, dass die Oberflächenkennwerte R_a und R_z mindestens um den Faktor 1,5 kleiner sind als vor der Bearbeitung. Das erstellte Oberflächenprofil zeigt (siehe Abbildung 5.18), dass die auf der Oberfläche befindlichen Spitzen nur noch eine maximale

Höhe von $0,5\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen. Nach dem Polieren sind damit die erzielten Oberflächenkennwerte R_a und R_z der SVB-Oberfläche fast identisch mit denen der Abformlehre.

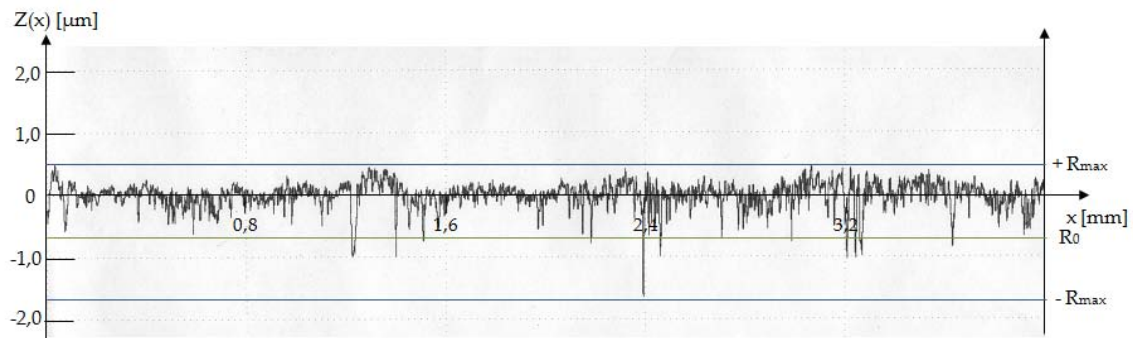


Abbildung 5.18: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6\text{ mm}$ mit $R_a = 0,149\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 1,52\text{ }\mu\text{m}$ der polierten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Bei der SVB-Oberfläche (Trennung von der Abformlehre im Alter von sieben Tagen) wurden durch das Polieren die Oberflächenkennwerte deutlich verschlechtert (siehe Tabelle 5.4). Möglicherweise wurden beim Polieren Körner aus der Oberfläche, verursacht durch zu starkes Aufdrücken der Schleifscheibe, abgetragen. Aus dem erstellten Oberflächenprofil wird deutlich (siehe Abbildung 5.19), dass Krater mit einer Tiefe von bis zu $4\text{ }\mu\text{m}$, für die hohen Oberflächenkennwerte R_a und R_z verantwortlich sind.

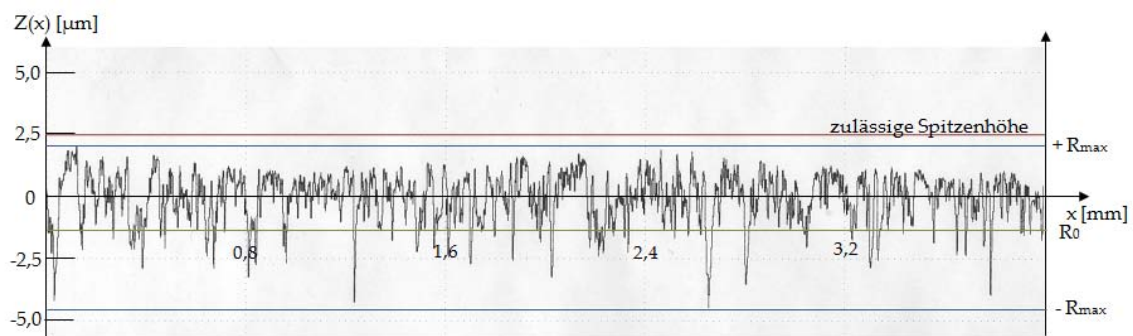


Abbildung 5.19: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6\text{ mm}$ mit $R_a = 0,776\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 5,69\text{ }\mu\text{m}$ der polierten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von sieben Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Die Oberflächenkennwerte R_a und R_z der polierten SVB-Oberflächen (Trennung im Alter von zwei Tagen) sowie das erstellte Oberflächenprofil sprechen für die Eignung als Luftführungsfläche. Die auf der Oberfläche befindlichen Spitzen mit einer Höhe von bis zu 500 nm sind für einen Luftspalt mit $h = 5\text{ }\mu\text{m}$ nicht funktionsrelevant. Trotz Spitzen mit einer Höhe von $2,2\text{ }\mu\text{m}$ kann die polierte SVB-Oberfläche als Führungsfläche verwendet werden.

5.4.5 Fazit - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel)

Anhand der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) konnte für das *direkte Abformen* auf den unbehandelten Abformlehren folgendes geschlussfolgert werden:

- *Kontaktzeit Abformlehre - SVB*
Die optische und taktile Wahrnehmung der abgeformten SVB-Oberfläche sowie die messtechnische Untersuchung mittels *Perthometer M1* zeigen, dass die Kontaktzeit (1/2 Tage und 7 Tage), zwischen der Abformlehre aus Gabbro und der SVB, die Oberflächenkennwerte R_a und R_z nicht beeinflusst. Diese Aussage konnte für die Variante Glas (BSG und KNG) nicht nachgewiesen werden, da die Trennung von Glas und SVB nach 24 h nicht möglich war (siehe Tabelle 5.1). Anhand der gesammelten Erfahrung beim Betonieren von SVB auf Glas wird ein adäquates Verhalten zum Gabbro vermutet.
- *Oberflächenkennwerte Glas*
Aus der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) wird deutlich, dass die abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG identisch sind. Die SVB-Oberflächen weisen sowohl bei der optischen und taktilen Wahrnehmung, sowie bei den messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte nur minimale Unterschiede auf. Darüber hinaus zeigen die bisherigen Untersuchungen, dass BSG im Vergleich zu KNC, trotz seiner chemischen Resistenz, keine höhere Eignung als Abformlehre aufweist.
- *Nachbearbeitung*
Die Nachbearbeitung der abgeformten SVB-Oberflächen mittels Läppen und Polieren erzielte unterschiedliche Oberflächenkennwerte. Dabei erwies sich das Läppen, im Gegensatz zum Polieren, als ungeeignet, da neben den feinen Spitzen auch die SVB-Oberfläche zum Teil mit abgetragen wurde. Die Oberflächenkennwerte der SVB-Oberflächen nach dem Polieren streuten sehr stark in zwei Richtungen. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse können keine klaren Aussagen getroffen werden, inwiefern eine Nachbearbeitung der SVB-Oberflächen sinnvoll ist.

Die im Vergleich zur Abformlehre starke Streuung der Oberflächenkennwerte R_a und R_z der SVB-Oberfläche wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Mögliche Ursachen dafür sind:

- Schwinden und Quellen des Zementsteins an der SVB-Oberfläche
- Schrumpfen der SVB-Oberfläche durch Carbonatisierung¹²
- Mikrorisse in der SVB-Oberfläche
- Chemische Reaktionen zwischen dem flüssigen SVB und der Abformlehre
- minimale Größe der Gesteinskörnung im SVB

¹²Die Carbonatisierung ist die chemische Umwandlung der alkalischen Bestandteile des Zementsteins durch CO_2 in Calciumcarbonat. Dadurch kann der pH-Wert der Porenlösung von außen nach innen fortschreitend unter 9,5 sinken [Wes93].

Ob und in welchem Ausmaß die genannten Ursachen die Oberflächenkennwerte R_a und R_z der abgeformten SVB-Oberflächen beeinflussen ist unbekannt und muss Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

In der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) wurden durch das *direkte Abformen* von SVB auf den Gläsern BSG und KNG, SVB-Oberflächen geschaffen, die aufgrund ihrer ausreichenden Rauheit ($R_a = 0,22 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,2 \mu\text{m}$) als Führungsflächen für aerostatische Führungen eingesetzt werden können. Bei der Variante SVB-Gabbro wurden SVB-Oberflächen geschaffen, deren Oberflächenkennwerte R_a und R_z in den geforderten Größenordnungen liegen. So dass auch angesichts des Vorhandenseins einzelner Spitzen auf der SVB-Oberfläche nichts gegen den Einsatz als Führungsfläche für aerostatische Führungen spricht.

Versuche, nur die Spitzen auf der SVB-Oberfläche abzutragen, lieferten unterschiedliche Ergebnisse, da zum einen die Oberflächenkennwerte R_a und R_z an einigen Stellen deutlich verbessert, aber wiederum an anderen genau das Gegenteil erreicht wurde.

Problematisch war die Aussagekraft von R_a und R_z hinsichtlich der Tauglichkeit als Führungsfläche. Die messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte waren mindestens um den Faktor 2 größer als die zulässigen, was durch die zum Teil tiefen Krater erklärbar ist, so dass die SVB-Oberflächen als Führungsflächen für aerostatische Führungen verwendet werden können.

5.4.6 Beurteilen der SVB-Oberflächen - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)

SVB abgeformt Gabbro

Bei der optischen Betrachtung der drei abgeformten SVB-Oberflächen von Gabbro, bei denen PTFE-Spray als Trennmittel verwendet wurde, konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Im Zentrum der SVB-Oberflächen konnten keine Risse, sondern nur vereinzelt Lufteinschlüsse beobachtet werden (siehe Abbildung ??). Dabei sind besonders im Randbereich vermehrt Lufteinschlüsse, von bis zu 3 mm Durchmesser, aufgetreten. Die Kanten waren bei diesen Probekörpern komplett gebrochen. Die SVB-Oberfläche fühlte sich bei der taktilen Wahrnehmung leicht rau an. Dies lässt darauf schließen, dass die Krater in der SVB-Oberfläche ebenfalls durch den flüssigen SVB abgeformt wurden. Die drei abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro mit Wachspolitur-Beschichtung konnten nach dem Entschalen (Probenalter 1 Tag) optisch voneinander unterschieden werden. Beim Abformen von der Abformlehre wurden aus der SVB-Oberfläche kleine Stücke herausgebrochen (siehe Abbildung 5.20(b))

Die Ursachen für das Abplatzen konnten im Rahmen dieser Untersuchungen nicht eindeutig geklärt werden.

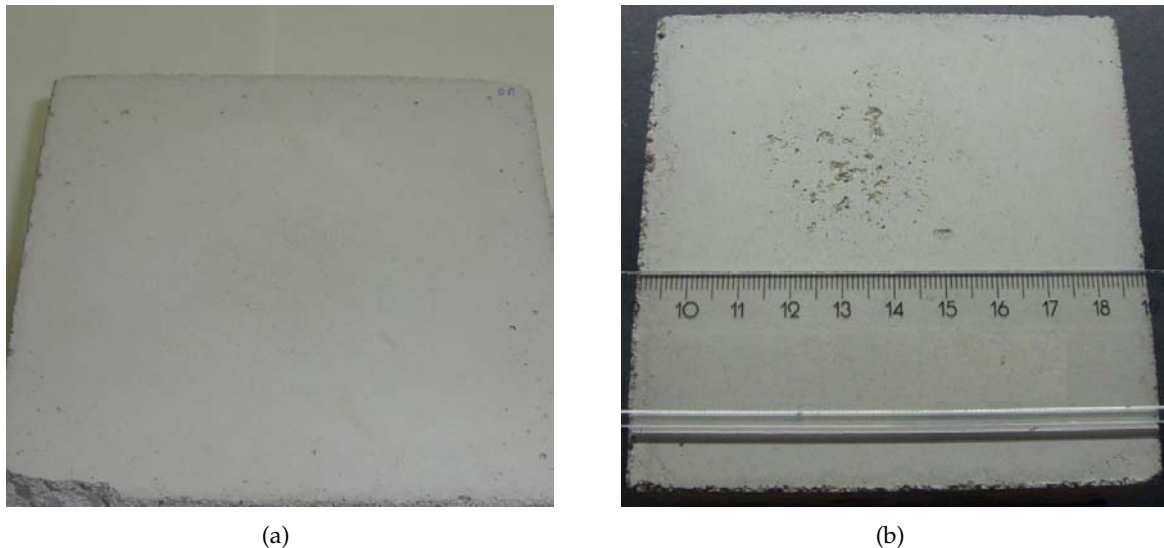


Abbildung 5.20: Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro „Nero Impala“ mit (a) PTFE- und (b) Wachspolitur-Beschichtung. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von einem Tag.

SVB abgeformt auf Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas

Beim optischen Vergleich der drei abgeformten SVB-Oberflächen von KNG und BSG mit Aquapel-Beschichtung konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Auch die drei abgeformten SVB-Oberflächen auf KNG und BSG mit PTFE- und Resist-Beschichtung waren identisch.

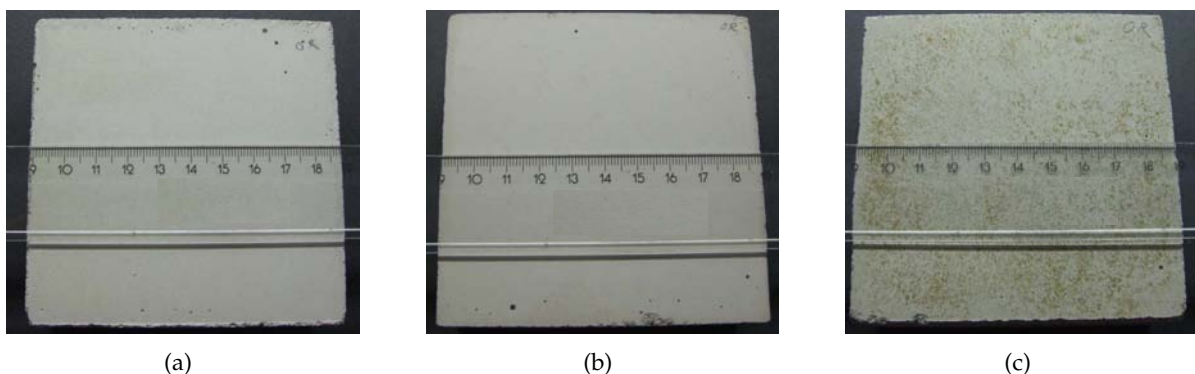


Abbildung 5.21: Gegenüberstellung von drei abgeformten SVB-Oberflächen auf Borosilicatglas mit (a) Aquapel-, (b) PTFE- und (c) Resist-Beschichtung. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von einem Tag.

Auf allen 18 SVB-Oberflächen waren keine Risse feststellbar. Im Randbereich wurden vermehrt Lufteinschlüsse mit einem Durchmesser von bis zu einem Millimeter sichtbar. Alle Kanten der SVB-Oberflächen waren vollständig gebrochen. Die von den beschichteten Gläsern abgeformten SVB-Oberflächen konnten nur anhand ihrer Oberflächenfärbung voneinander differenziert werden. Abbildung 5.21(a), Abbildung 5.21(b) und Abbildung 5.21(c) zeigen die verschiedenen

abgeformten SVB-Oberflächen. Bei der taktilen Wahrnehmung fühlten sich alle SVB-Oberflächen rau und staubig an. Dies lässt vermuten, dass die Rauheit der abgeformten SVB-Oberflächen größer im Vergleich zur Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) ist.

5.4.7 Auswertung der Messergebnisse - Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel)

Anhand der optischen und taktilen Beurteilung wurde zu beobachten, dass, bis auf die Variante Gabbro-Wachspolitur-SVB, unter Verwendung der gleichen Abformlehenbeschichtung, für jede Abformung, identische SVB-Oberflächen entstanden sind. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden jeweils nur zwei abgeformte SVB-Oberflächen je Abformlehre, im Alter von einem Tag, untersucht.

Tabelle 5.5: Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der zweiten Versuchsreihe und der Abformlehen

	Trennmittel	Mittenrauwert R_a [μm]	gemittelte Rautiefe R_z [μm]
SVB abgeformt auf			
Gabbro	Hartwachs *	-	-
	PTFE-Spray (Nr. 1)	0,712	5,836
	PTFE-Spray (Nr. 2)	1,225	9,200
Kalk-Natron-Glas	Aquapel (Nr. 1)	0,865	5,661
	Aquapel (Nr. 2)	1,008	6,751
	PTFE-Spray (Nr. 1)	0,888	5,441
	PTFE-Spray (Nr. 2)	0,852	5,441
	Resist (Nr. 1)	1,369	8,686
	Resist (Nr. 2)	2,097	12,656
Borosilicatglas	Aquapel (Nr. 1)	0,732	4,899
	Aquapel (Nr. 2)	1,430	9,448
	PTFE-Spray (Nr. 1)	0,844	5,706
	PTFE-Spray (Nr. 2)	1,396	9,082
	Resist (Nr.1)	1,718	9,741
	Resist (Nr.2)	1,298	9,398

* keine Messung durchgeführt

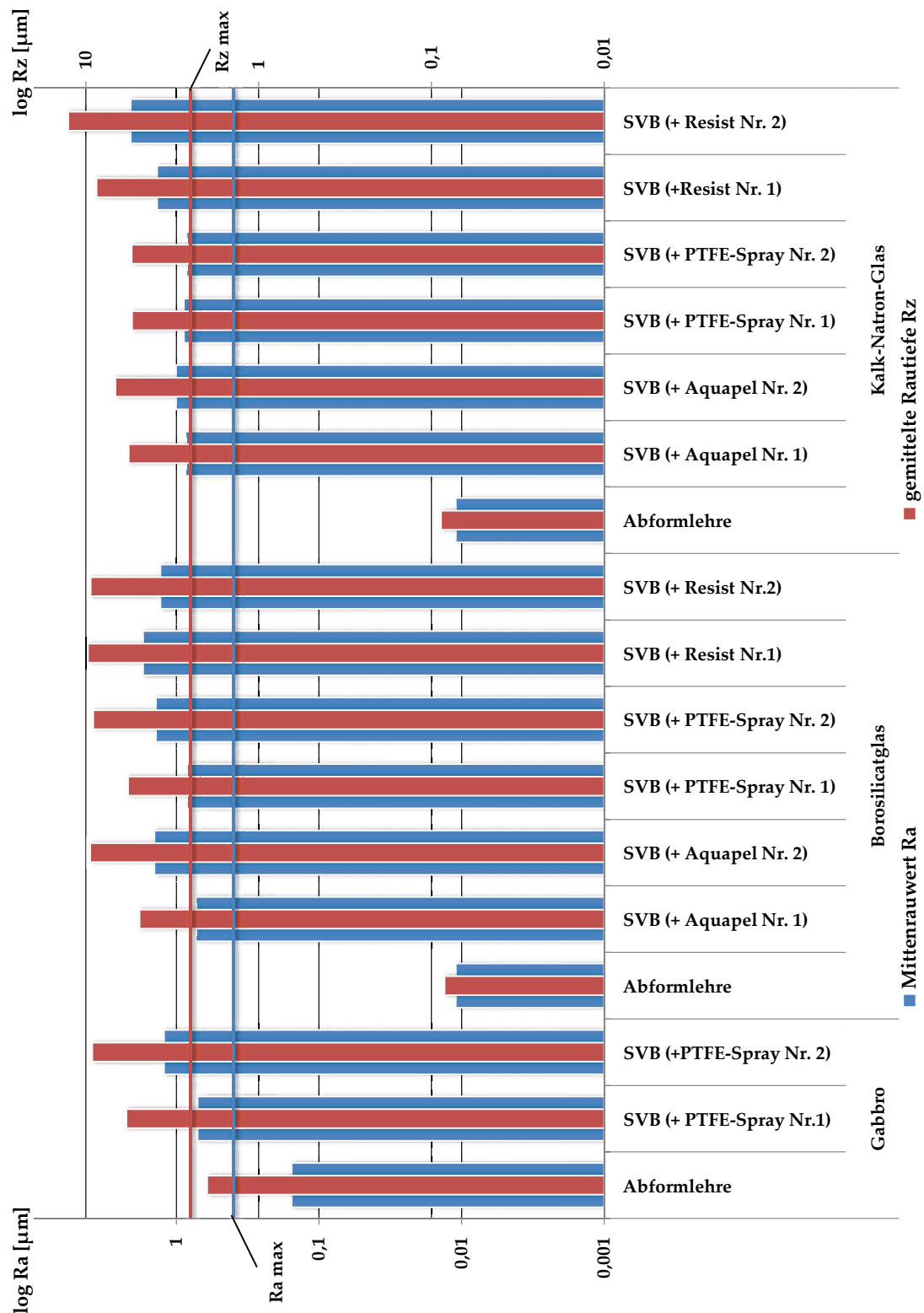


Abbildung 5.22: Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der zweiten Versuchsreihe und der Abformlehren

SVB abgeformt auf Gabbro mit PTFE-Beschichtung

Aus Tabelle 5.5 und Abbildung 5.22 wird deutlich, dass die Oberflächenkennwerte R_a und R_z innerhalb der abgeformten SVB-Oberflächen stark schwanken. Der Mittenrauwert R_a weicht untereinander um rund fünf Hundertstel Mikrometer. Die gemittelte Rautiefe R_z streut um rund $4,5\text{ }\mu\text{m}$.

Anhand des erstellten Oberflächenprofils einer beliebigen Messstrecke l_n und der darin eingezeichneten mittleren Rautiefe R_0 wurde deutlich, dass die mit unter hohen R_a - und R_z -Werte vorwiegend durch Spitzen mit einer Höhe von bis zu $5\text{ }\mu\text{m}$ hervorgerufen wurden.

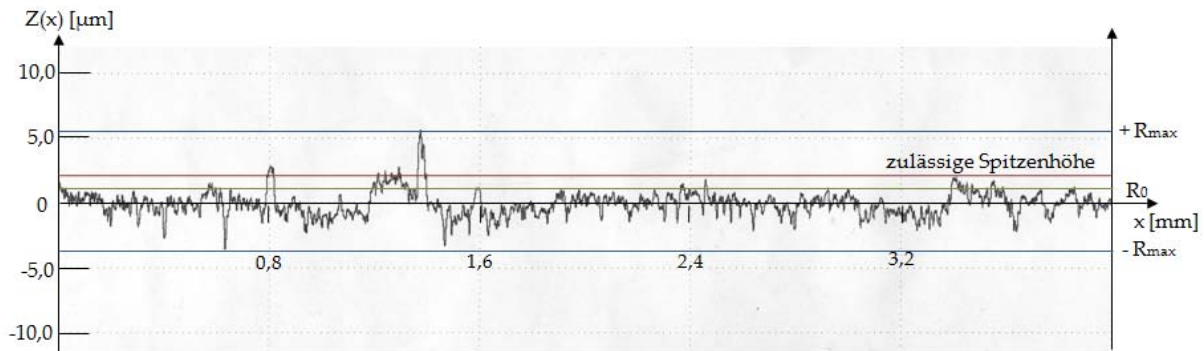


Abbildung 5.23: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6\text{ mm}$ mit $R_a = 0,723\text{ }\mu\text{m}$ und $R_z = 5,51\text{ }\mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem *Perthometer M1*

Die abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro mit PTFE-Beschichtung können nicht als Luftführungsflächen für aerostatische Führungen eingesetzt werden.

SVB abgeformt auf Kalk-Natron-Glas und Borosilicatglas mit Aquapel-Beschichtung

Die Oberflächenkennwerte R_a und R_z der abgeformten SVB-Oberflächen auf BSG und KNG mit *Aquapel*-Beschichtung streuen innerhalb der Abformlehren. Aus Tabelle (5.5) kann entnommen werden, dass die R_a - und R_z -Werte der vier untersuchten SVB-Oberflächen in der gleichen Größenordnung liegen. Der Mittenrauwert R_a nimmt innerhalb der Gläser Werte zwischen $0,732\text{ }\mu\text{m}$ und $1,43\text{ }\mu\text{m}$ an. Die gemittelte Rautiefe R_z schwankt dabei zwischen $4,899\text{ }\mu\text{m}$ und $9,448\text{ }\mu\text{m}$.

Angesichts der erstellten Oberflächenprofile (siehe Abbildung 5.24 und 5.25) wird die Ursache für die hohen Oberflächenkennwerte im Vergleich zur Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) deutlich. Die komplette SVB-Oberfläche (siehe Abbildung 5.24) ist vollständig mit Spitzen und Kratern konstanter Höhe (bzw. Tiefe) überzogen. Abbildung 5.25 ähnelt sehr stark der Abbildung 5.24, wobei hier vereinzelt Spitzen und auch Krater mit einer Höhe (bzw. Tiefe) von bis zu $7,5\text{ }\mu\text{m}$ sichtbar sind. Die hohen Oberflächenkennwerte R_a und R_z wurden nicht wie vermutet, vorwiegend durch Krater, sondern ebenso durch Spitzen hervorgerufen.

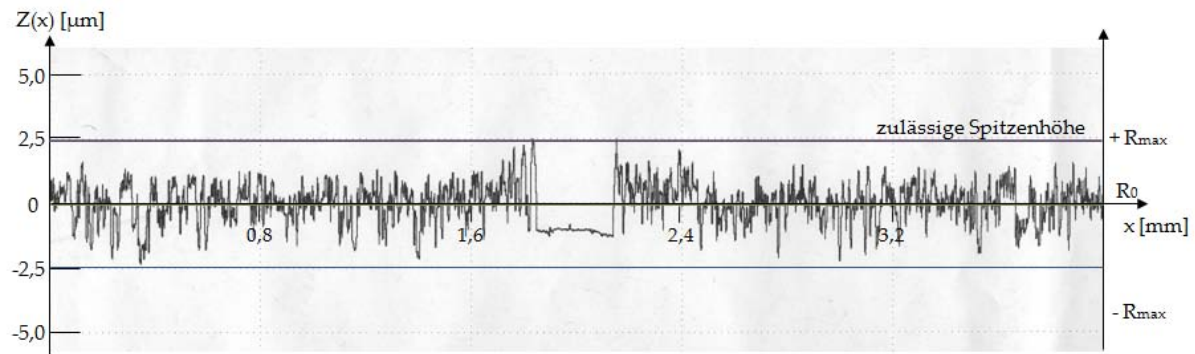


Abbildung 5.24: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,639$ μm und $R_z = 3,77$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit Aquapel-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

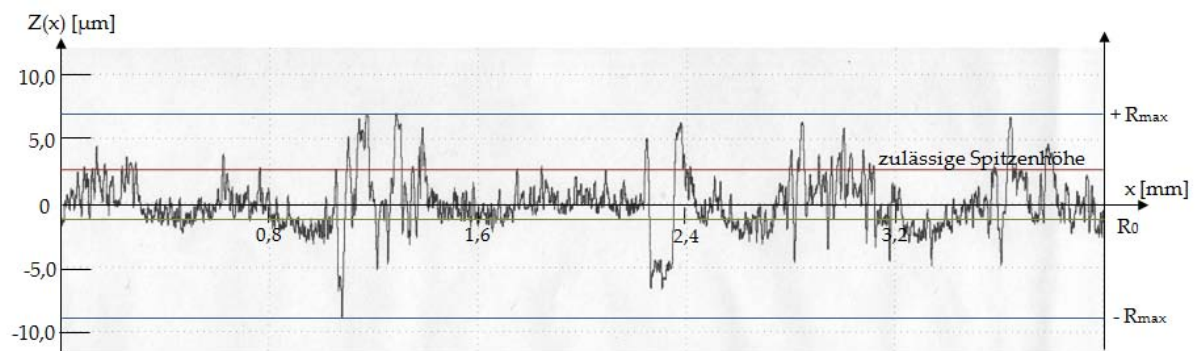


Abbildung 5.25: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 1,545$ μm und $R_z = 7,92$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit Aquapel-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Aufbauend auf den messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerten R_a und R_z sowie den erstellten Oberflächenprofilen sind die abgeformten SVB-Oberflächen als Luftführungsflächen ungeeignet.

SVB abgeformt auf Kalk-Natron-Glas und Borosilicatglas mit PTFE-Beschichtung

Bei der Variante KNG mit PTFE-Beschichtung und SVB weisen die SVB-Oberflächen im Alter von einem Tag identische Oberflächenkennwerte auf. Der Mittenrauwert R_a liegt im Bereich von $0,8$ μm und die gemittelte Rautiefe bei $5,4$ μm (siehe Tabelle 5.5). Die von den beschichteten BSG abgeformten SVB-Oberflächen messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte R_a und R_z streuen wiederum untereinander. Der Mittenrauwert R_a um rund sechs Zehntel Mikrometer und die gemittelte Rautiefe R_z und rund drei Mikrometer.

Die erstellten Oberflächenprofile (siehe Abbildung 5.26 und 5.27) ähneln denen aus dem vorherigen Abschnitt. Bei der Variante KNG mit PTFE-Beschichtung und SVB ist ein periodischer

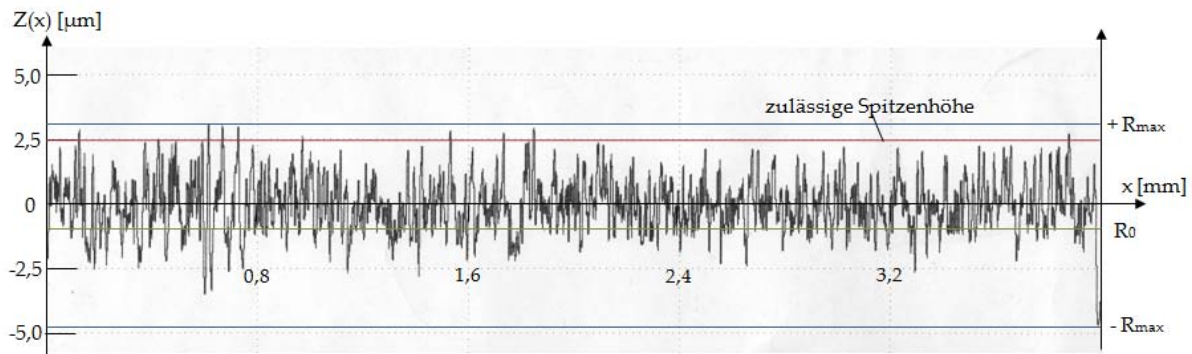


Abbildung 5.26: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,850$ μm und $R_z = 6,37$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

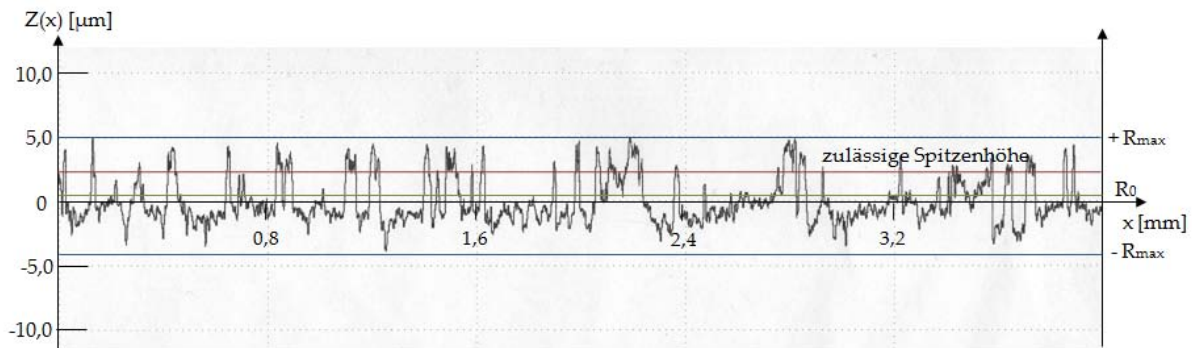


Abbildung 5.27: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 1,359$ μm und $R_z = 8,27$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

Wechsel von Spitzen und Krater konstanter Höhe (bzw. Tiefe) zu beobachten. In Abbildung 5.27 erfolgt ebenfalls ein periodischer Wechsel von Spitze und Krater, wobei die Spitzen im Durchschnitt doppelt so groß wie die Krater sind. Dies bedeutet, dass bei diesen Varianten die hohen Oberflächenkennwerte R_a und R_z ebenfalls auf Spitzen und Tälern in der SVB-Oberfläche zurückzuführen sind und damit für den Einsatz als Führungsfläche für aerostatische Führungen ungeeignet sind.

SVB abgeformt auf Kalk-Natron-Glas und Borosilicatglas mit Resist-Beschichtung

Die R_a - und R_z -Werte der abgeformten SVB-Oberflächen von BSG und KNG mit Resist-Beschichtung streuen untereinander und innerhalb der Versuchsreihe (siehe Tabelle 5.5). Der Mittenrauwert R_a streut innerhalb der Gläser (BSG und KNG) zwischen 1,298 μm und 2,097 μm . Die gemittelte Rautiefe R_z schwankt zwischen 8,686 μm und 12,656 μm . In Abbildung 5.28 und 5.29 ist das Oberflächenprofil einer beliebig gewählten Messstrecke l_n dargestellt.

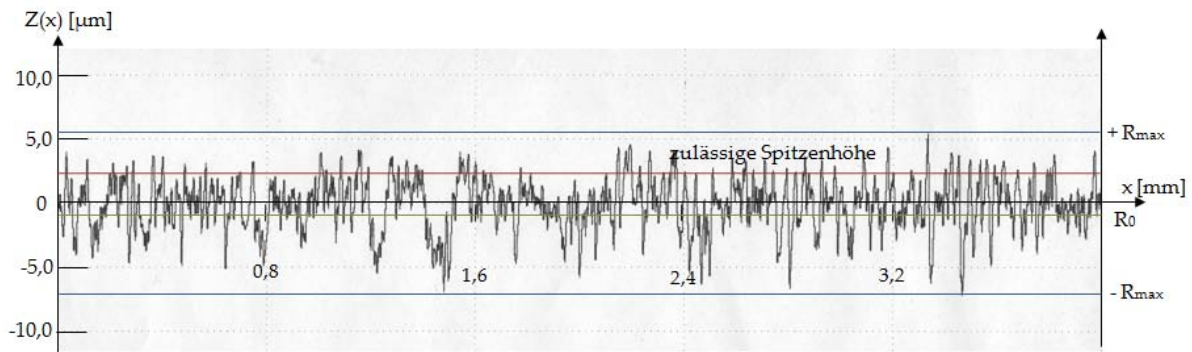


Abbildung 5.28: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 1,615$ μm und $R_z = 10,9$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit Resist-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

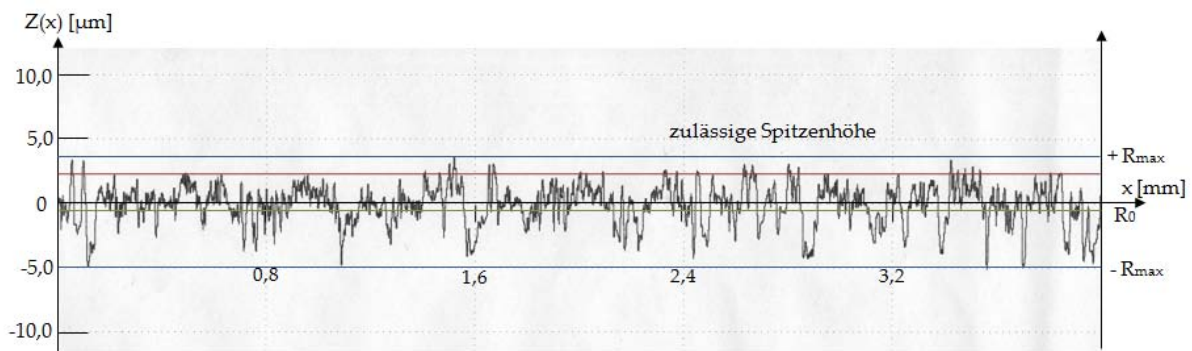


Abbildung 5.29: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 1,218$ μm und $R_z = 7,92$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit Resist-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem Perthometer M1

An den abgeformten SVB-Oberflächen auf KNG und BSG mit Resist-Beschichtung wurde deutlich, dass die hohen Oberflächenkennwerte R_a und R_z auf das Vorhandensein von Spitzen als auch Krater mit Höhen (bzw. Tiefen) von bis zu 5 μm oder mehr zurückzuführen sind. Dies wird auch durch den Abstand zwischen der Mittellinie des Profils und der Linie für die mittlere Rautiefe R_0 graphisch verdeutlicht.

5.4.8 Fazit - Versuchsreihe Abformlehre SVB (mit Trennmittel)

Anhand der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) kann für das *direkte Abformen* auf den beschichteten Abformlehren folgendes geschlussfolgert werden:

- *Reproduzierbarkeit*

Aus den Messergebnissen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) wird

deutlich, dass durch den Einsatz des Trennmittels, bis auf die Abformlehre KNG mit PTFE-Beschichtung, zwei identische SVB-Oberflächen abgeformt wurden. Bei der Variante KNG mit PTFE-Beschichtung und SVB wurden zwei vergleichbare Oberflächen geschaffen, bei denen der Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z in der gleichen Größenordnung liegen. Aus den weiteren Versuchen wird deutlich, dass die Herstellung identisch abgeformter SVB-Oberflächen mit den eingesetzten Trennmitteln nicht möglich war.

- *Oberflächenkennwerte vergrößert*

Die messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte R_a und R_z der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) sind im Vergleich zur Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) gestiegen. In der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) wurden auf KNG SVB-Oberflächen mit einem R_a -Wert von ca. $0,22\ \mu\text{m}$ geschaffen. Der kleinste R_a -Wert in der zweiten Versuchsreihe lag bei $0,732\ \mu\text{m}$ (BSG mit *Aquapel*-Beschichtung). Das bedeutet, dass der Mittenrauwert R_a mindestens um den Faktor drei und die gemittelte Rautiefe R_z um den Faktor zwei gestiegen sind. Aufgrund von fehlenden Oberflächenkennwerten der beschichteten Abformlehren können keine Aussagen über die Abformgenauigkeit sowie über die Ursache der Streuung der R_a - und R_z -Werte zur Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) getroffen werden.

Zusammenfassend kann für die zweite Versuchsreihe gesagt werden, dass durch das *direkte Abformen* von SVB auf den beschichteten Abformlehren keine SVB-Oberflächen geschaffen wurden, die als Führungsfläche für aerostatische Führungen geeignet sind. Einerseits streuten die messtechnisch erfassten Oberflächenkennwerte R_a und R_z von den geforderten Kennwerten der Hersteller. Andererseits zeigten die erstellten Oberflächenprofile, dass die SVB-Oberflächen fast vollständig mit dicht aneinander gereihten Spitzen überzogen sind, die die Größenordnungen zwischen $2,5$ und $7,5\ \mu\text{m}$ besitzen.

5.5 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen

Die Ergebnisse aus der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) zum Haftverbund, sind in Abbildung 5.30 gegenübergestellt.

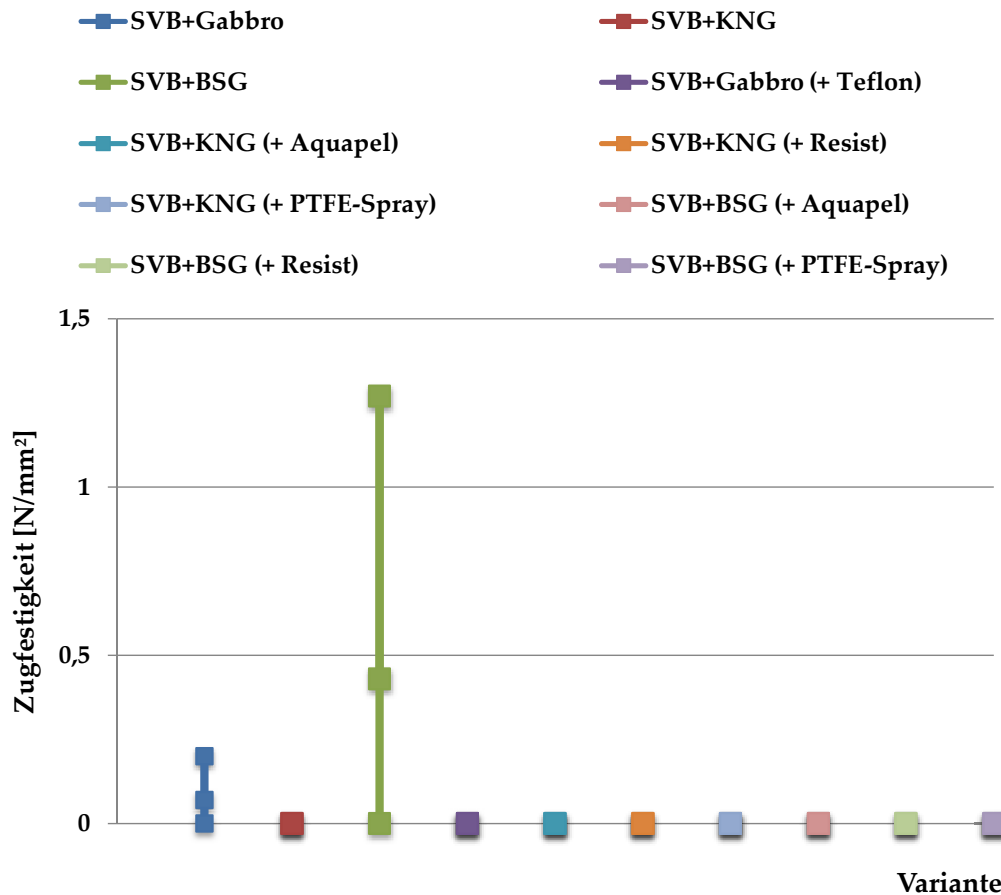


Abbildung 5.30: In dieser Abbildung sind die messtechnisch erfassten Zugfestigkeiten der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) gegenübergestellt. Aus jeder Variante wurde jeweils der Maximalwert, der Minimalwert und der Mittelwert heraus gestellt.

Zusammenfassend kann für die Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) (Variante 1, 2, 3 aus Abbildung 5.30) gesagt werden, dass zwischen den eingesetzten Abformlehren und dem SVB im Alter von einem und sieben Tagen ein Haftverbund feststellbar war. Die messtechnisch erfassten Kennwerten schwankten je Abformlehre und auch innerhalb der Probekörper. Es war zum einen möglich die Abformlehre und den SVB mittels Handkraft voneinander zu trennen und zum anderen wurden Zugfestigkeiten von bis zu $1,27 \text{ N/mm}^2$ gemessen (siehe Tabelle 5.1).

Aus der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) wird deutlich, dass durch die Beschichtung der Abformlehren, die Trennung von SVB im Probenalter von einem Tag möglich

war. Der Haftverbund zwischen den Abformlehren und dem SVB wurde nicht messtechnisch erfasst, da diese direkt nach dem Entschalen mittels Handkraft voneinander gelöst werden konnten. Obwohl die Trennung per Handkraft möglich war, existierte ein Haftverbund, der ein gegenseitiges Auseinanderziehen von Abformlehre und SVB erschwerte (siehe Abschnitt 5.3.1).

Als mögliche Ursachen für den Haftverbund zwischen den Abformlehren und dem SVB der beiden Versuchsreihe kommen in Betracht:

- *Oberflächenspannung des Wassers*

Eine mögliche Ursache für den schwankenden Haftverbund kann in der hohen Restfeuchte im SVB gesehen werden. Glatte Oberflächen mit geringer Rautiefe können sich großflächig bis auf wenige Nanometer annähern. In diesem Fall entsteht ein Haftverbund, verursacht durch die Oberflächenspannung¹³ des Wassers, welches sich zwischen den Grenzflächen der Abformlehre und dem SVB befindet. Diese Vermutung kann durch die Tatsache gestützt werden, dass nach der Trennung von SVB und Abformlehre auf beiden Elementen ein dünner Wasserfilm zu beobachten war.

- *Alkali-Kiesel-Reaktion*

Der schwankende Haftverbund im Probenalter von einem Tag kann durch eine mögliche Alkali-Kiesel-Reaktion (AKR) zwischen den Alkalien des Zementsteins und alkalilöslicher Kieselsäure in den Gläsern verursacht werden. Diese chemische Reaktionen dürfte eigentlich nur beim KNG auftreten (siehe Abschnitt 2.5), da sich BSG durch einen sehr niedrigen Alkalianteil auszeichnet. Aufgrund von allgemein fehlenden Kenntnissen über die chemischen Vorgänge beim Erhärten von Beton (Hydratation) sowie den chemischen Reaktion beim Kontakt mit *anorganisch nichtmetallischen Werkstoffen* und *Nichtmetallen* können im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Aussagen getroffen werden.

- *Chemische Reaktion*

Der Haftverbund zwischen den beschichteten Abformlehren kann auch auf eine chemische Reaktionen zwischen der Abformlehre, dem Trennmittel und dem flüssigen SVB zurückgeführt werden.

In Abbildung 5.31 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Haftverbund und zur Oberflächenanalyse der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) gegenübergestellt.

Aus der Oberflächenanalyse kann zusammenfassend gesagt werden, dass es nur in der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) möglich war, durch das *direkte Abformen* SVB-Oberflächen zu schaffen, die hinsichtlich ihrer Rauheit als Führungsflächen für aerostatische

¹³Die Oberflächenspannung des Wassers verursacht Kapilarkräfte in engen Spalten, wodurch sich glatte Oberflächen beim Trocknen annähern. Ein dauerhaftes Haften nach der Abtrocknung werden durch Wasserstoffbrückenbindung, Anziehungskräfte zwischen Dipolen oder van-der-Waalsche Bindung verursacht.

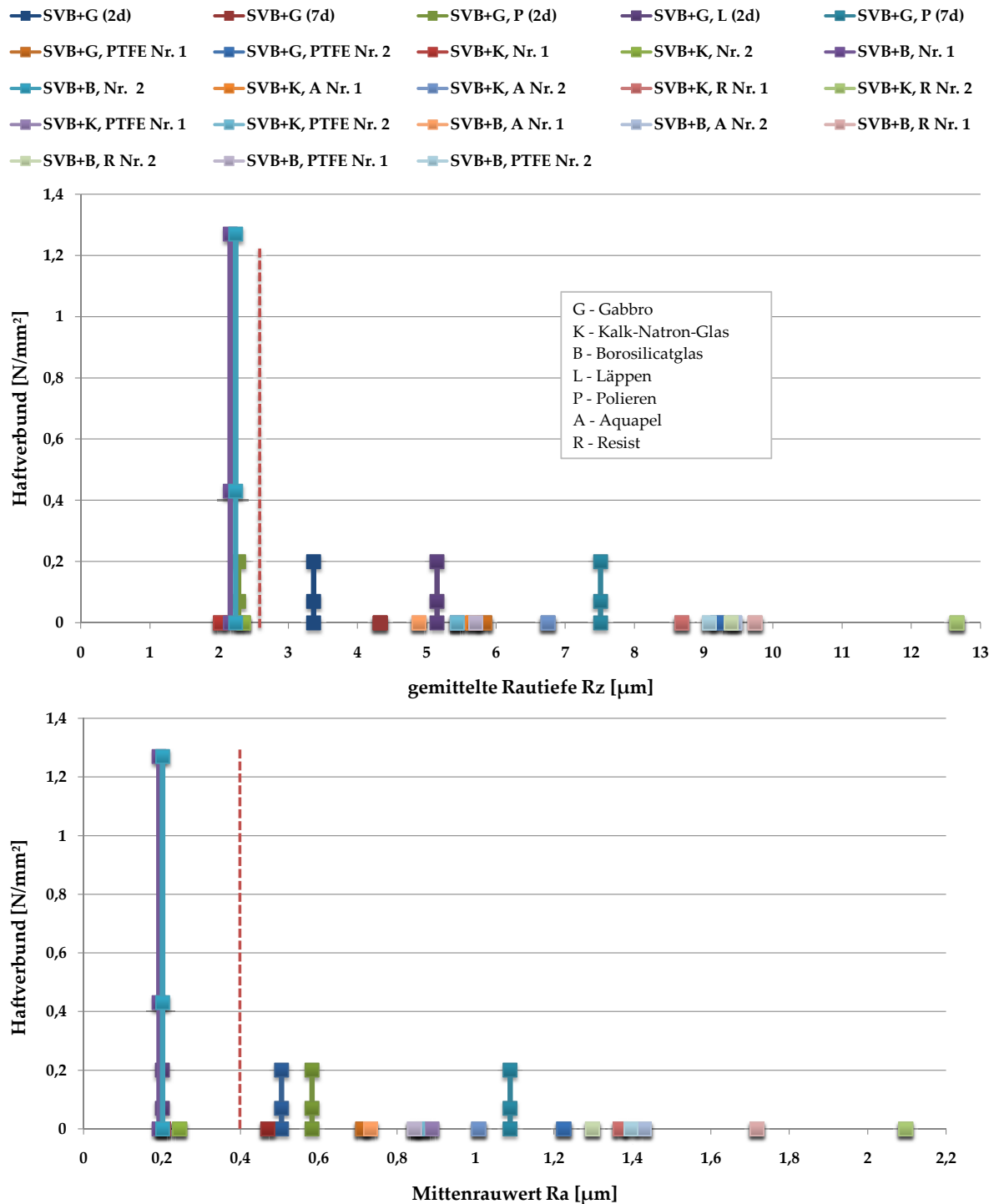


Abbildung 5.31: In den beiden Diagrammen sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Auf der Ordinate sind die gemessenen Zugfestigkeiten und auf der Abszisse jeweils die messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a sowie die gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen dargestellt. Die gestrichelten roten Linien markieren die geforderten Oberflächenkennwerte der Hersteller von Luftlagerelementen.

Führungen eingesetzt werden können. Es zeigte sich, dass mit den Gläsern BSG und KSG trotz großer Schwankungen in den Haftverbunduntersuchungen hier SVB-Oberflächen mit einem Mittenrauwert R_a von rund $0,22\text{ }\mu\text{m}$ und einer gemittelten Rautiefe R_z von rund $2,2\text{ }\mu\text{m}$ geschaffen werden konnten. Weiterhin wurde festgestellt, dass alle vier untersuchten SVB-Oberflächen beinahe identische R_a - und R_z -Werte aufweisen.

Mit der Variante Gabbro-SVB war es ebenfalls möglich, SVB-Oberflächen zu schaffen, die für den Einsatz als Luftführungsfläche geeignet sind. Die abgeformten SVB-Oberflächen aus der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) waren aufgrund der hohen Oberflächenkennwerten R_a und R_z nicht als Führungsflächen für aerostatischen Führungen geeignet.

Für das *direkte Abformen* von Führungsflächen mit SVB kann zusammenfassend festgestellt werden:

1. Die Abformlehren sind vor dem Betonieren von Partikeln und Schmierstoffen zu befreien. Eine Reinigung mittels Aceton und Isopropanol erwies sich als ausreichend.
2. Die eingesetzte Abformlehre sollte minimal größer als die Schalung sein, da somit das Brechen der Kanten am SVB-Gestell deutlich minimiert werden.
3. Beim Befüllen der Schalung ist darauf zu achten, dass dies möglichst in einem Arbeitsgang und aus einer geringen Höhe geschieht. Die Entstehung von Luftblasen wird deutlich minimiert.
4. Das Entschalen des SVB-Gestells, 24h nach der Herstellung ist problemlos möglich. Die Trennung von SVB-Gestell und Abformlehre sollte frühestens nach sieben Tagen (Ende der Feuchtlagerung) durchgeführt werden. Weiterhin ist von einer Trennung durch gegenseitiges Auseinanderziehen abzuraten. Für die Trennung von Abformlehre und SVB sind weitere Untersuchungen notwendig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen über den Einsatz von HGB als Gestellwerkstoff mit Führungsflächen für aerostatische Führungen zeigen, dass prinzipiell HGB als Alternativwerkstoff zu den sonst häufig verwendeten Gestellwerkstoffen Stahl, Granit, Gusseisen, Aluminium und Mineralguss eingesetzt werden kann. Mit dem Verfahren *direktes Abformen* konnten Probekörper betoniert werden, die aufgrund der Oberflächenparameter Rauheit als Führungsfläche für aerostatische Führungen eingesetzt werden können.

Das Ziel ist die Schaffung von Führungsflächen für aerostatische Führungen auf einem HGB-Gestell. Hierzu wurden zu Beginn der Arbeit die Verfahren *Einbetten* und *Abformen* charakterisiert und deren Vor- und Nachteile im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit miteinander verglichen. Die Vorteile des *direkten Abformens* liegen aus fertigungstechnischer Sicht in der Schaffung von Führungsflächen in nur einem Arbeitsschritt und einem geringeren Kostenfaktor gegenüber des Verfahrens *Einbetten*. Im Fokus dieser Arbeit stand das *direkte Abformen* von HGB auf ebenen Abformlehren für die Fertigung von Grundgestellen mit Führungsflächen für aerostatische Führungen. In einer parallelen Studie wird an der *Technischen Universität Ilmenau* das *Einbetten* von ebenen Führungsflächen in HGB untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Patentrecherche zum *direkten Abformen* durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag auf dem Finden von Patentschriften, Offenlegungsschriften oder Patentanmeldungen, in denen Fertigungsprozesse oder Abformmassen zur Schaffung von Führungsflächen patentrechtlich geschützt sind. Die Schwierigkeiten der Patentrecherche zu dieser Thematik waren die subjektiven Beurteilungen der abgeformten Flächen im Hinblick auf die erzielte Ebenheit und Rauheit. In dieser Recherche konnten keine Patente zum *direkten Abformen* von SVB gefunden werden.

Für die Auswahl der Abformlehren wurden die Werkstoffe betrachtet, die vorwiegend als Gestellwerkstoffe eingesetzt und auf denen Führungsflächen für aerostatische Führungen durch Urformverfahren oder durch anschließende subtraktive Bearbeitung der Oberfläche geschaffen werden konnten. Hier zeigte sich, dass sowohl Glas, Granit und Metalle aufgrund der Oberflächenparameter Rauheit und Ebenheit sowie ihrer Steifigkeit als Abformlehren geeignet sind. Gegen den Einsatz von Metall als Abformlehre sprach der Aspekt einer möglichen Korrosion aufgrund des vorhandenen Wassers im SVB. Neben den in dieser Arbeit untersuchten Werkstoffen Gabbro, Kalk-Natron-Glas und Borosilicatglas sollten im Rahmen weiterführender Untersuchungen Werkstoffe, wie z. B. Stahl, Gusseisen und Aluminium oder Kunststoffe und Keramiken auf ihre Eignung als Abformlehren untersucht werden.

In dieser Arbeit wurde nur ein HGB als Abformmasse eingesetzt. Hierbei handelte es sich um einen selbstverdichtenden Beton (kurz: SVB) der im Vorfeld hinsichtlich seiner Eignung als Gestellwerkstoff für MPG untersucht wurde. Schwerpunkt lag in der Bestimmung der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie dem Schwinden. Der Vergleich der messtechnisch erfassten Materialkennwerte des SVB mit denen von Gabbro „Nero Impala“ zeigte, dass die Festigkeits- und thermischen Kennwerte des SVB nicht in den gleichen Größenordnungen liegen. In Hinblick auf das Einsatzgebiet sprechen die Eigenschaften vom SVB dennoch für den Einsatz als Grundgestell für aerostatische Führungen. Als problematisch könnte sich das Schwinden und Kriechen erweisen und damit gegen den Gestellwerkstoff SVB sprechen. Inwiefern das Schwinden und Kriechen den Oberflächenparameter die Ebenheit beeinflusst, konnte aufgrund fehlender Untersuchungen an groß dimensionierten Probekörpern ($A \geq 1 \text{ m}^2$) nicht festgestellt werden.

Die Eigenschaften des SVB können in bestimmten Grenzen beeinflusst werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigendem Gehalt an Gesteinskörnung eine Senkung der Parameter (Festigkeit, Schwinden, Kriechen und thermischen Eigenschaften) zu erwarten ist. Genaue Grenzen hierfür lassen sich jedoch nicht festlegen.

Die erzielten Ergebnisse aus den Haftverbunduntersuchungen sind aufgrund der geringen Anzahl der Probekörper nur eingeschränkt verwertbar und aussagekräftig. Die Untersuchungen zum Haftverbund zeigten, dass zwischen den Abformlehren und dem SVB ein Haftverbund existiert, dessen messtechnisch erfasste Kennwerte, je Abformlehre und auch innerhalb der Probekörper selbst schwanken. Für statistisch abgesicherte Ergebnisse sind weitere Untersuchungen notwendig.

Weiterhin zeigten diese Untersuchungen, dass eine Trennung von Abformlehre und SVB durch gegenseitiges Auseinanderziehen bis zum siebten Tag nach der Herstellung der Probekörper vermieden werden sollte. In diesem Fall ist eine Prüfung der Aussagen durch weitere Untersuchungen zu empfehlen. Die abgeformten SVB-Oberflächen, insofern möglich, wurden anschließend hinsichtlich der Oberflächenparameter Rauheit untersucht.

Die Oberflächenanalyse der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) zeigte, dass die abgeformten SVB-Oberflächen aufgrund ihrer geringen Rauheit und des erstellten Oberflächenprofils als Führungsfläche für aerostatische Führungen geeignet sind. Besonders hervorzuheben sind dabei die Varianten Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas mit SVB. Die messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a liegen im Bereich von ca. $0,22 \mu\text{m}$ und die gemittelten Rautiefen R_z bei ca. $2,2 \mu\text{m}$. Vom Einsatz von Trennmitteln ist aufgrund der erzielten Messergebnisse abgeraten. Sollte dennoch die Notwendigkeit einer Beschichtung bestehen, ist vor dem Betonieren die Eignung des Trennmittels zu untersuchen.

Die Aussagen über die Eignung der abgeformten SVB-Oberflächen beziehen sich nur auf die Rauheit der SVB-Oberflächen. Messungen zur Ebenheit wurden nicht durchgeführt und sind aufgrund der geringen Oberfläche der Probekörper ($A = 100 \text{ mm}^2$) nur wenig aussagekräftig.

Weitere Schritte, die auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit zum *direkten Abformen* durchzuführen sind:

- *Ebenheitsmessung*
Um Aussagen über die Ebenheit der abgeformten SVB-Oberflächen treffen zu können, sollten SVB-Probekörper mit einer Mindestlänge von einem Meter gegossen werden. An diesen sollte dann in definierten Zeitabständen Ebenheitsmessungen durchgeführt werden.
- *Schwinden und Kriechen*
Das Schwinden und Kriechen des eingesetzten SVB sollte ebenfalls an einem Probekörper mit einem Mindestvolumen von ca. $0,5\text{ m}^3$ untersucht werden. Im Moment ist nicht bekannt, inwiefern die Führungsfläche durch die beiden Effekte beeinflusst wird und vor allem in welchen Größenordnungen. Die Untersuchungen sollten über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr durchgeführt werden.
- *Abformmasse*
Im Rahmen dieser Arbeit wurde lediglich ein HGB als Abformmasse untersucht. Es ist zu empfehlen, Untersuchungen zum *direkten Abformen* durch Variation der Abformmasse durchzuführen. Entweder durch die Veränderung der SVB-Rezeptur oder die Verwendung von beispielsweise hochfesten Beton (HFB) oder ultrahochfester Beton (UHFB).
- *Trennmittel*
Trotz der Verschlechterung der Oberflächenkennwerte R_a und R_z der SVB-Oberflächen in dieser Arbeit, sollten weitere Trennmittel auf ihre Eignung überprüft werden. Hierzu empfiehlt es sich, die Oberflächenparameter Rauheit und Ebenheit der Abformlehren, der beschichteten Abformlehren, der abgeformten HGB-Oberflächen und der Abformlehre nach dem Betonieren messtechnisch zu erfassen. Anhand der Vergleichswerte können Aussagen über die Abformgenauigkeit getroffen werden.
- *Größere Probekörper*
In weiteren Untersuchungen sollte die Größe der zu betonierenden Probekörper variiert werden. Anhand der Probekörper können Untersuchungen zum Haftverbund durchgeführt werden, mit dem Ziel, Aussagen über die Trennung zwischen Abformlehre und SVB in Abhängigkeit von der Oberfläche zu treffen.

Die experimentellen Untersuchungen offenbarten das Potenzial von HGB, insbesondere von SVB, zum *direkten Abformen* und damit zur Schaffung von Luftführungsflächen für aerostatische Führungen. Neben den guten Werkstoffeigenschaften liegt der Hauptvorteil dieses Werkstoffes in der Möglichkeit nahezu jede beliebige Bauteilgeometrie abzuformen.

Literaturverzeichnis

- [Ban04] BANTEL, Martin: *Messgeräte-Praxis: Funktion und Einsatz moderner Messgeräte*. Leipzig : Carl Hanser Verlag, 2004
- [Bar82] BARTZ, Wilfried J.: *Luftlagerungen Grundlagen und Anwendungen*. 2 Aufl. Ehningen : expert verlag, 1982
- [Ber09] BERG, Marius: *Konstruktion eines Beton-Gestells für ein Messgerät*, Technische Universität, Projektarbeit, 2009
- [Bet09] BETONMARKETING DEUTSCHLAND GMBH: Version: 2009. <http://www.beton.org/fachinformationen/betonbautechnik/selbstverdichtender-beton.html>, Abruf: 30.09.2009. Online-Beitrag
- [Bun09] BUNDESVERBAND KRAFTWERKSNEBENPRODUKTE E.V.: *Selbstverdichtender Beton mit Flugasche*. Version: 2009. http://www.bvk-online.com/bvk_smartm/docs/PI29_SVB_05_07.pdf, Abruf: 07.10.2009. Produktpräsentation
- [Deu72] DEUTSCHER BETON-VEREIN E.V.: *Beton-Handbuch*. Wiesbaden : Bauverlag GmbH, 1972
- [DIN 1048-5] Norm DIN 1048-5 Juni 1991. *Prüfverfahren für Beton - Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper (DIN 1048-5-6:1991)*
- [DIN 1319-1] Norm DIN 1319-1 Januar 1995. *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe (DIN 1319-1-1:1995)*
- [DIN 4760] Norm DIN 4760 Juni 1982. *Gestaltsabweichungen - Begriffe, Ordnungssysteme (DIN EN 1770-6:1982)*
- [DIN EN 1048-5] Norm DIN EN 1770 April 1998. *Prüfverfahren - Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (DIN EN 1770-4:1998)*
- [DIN EN 12350-5] Norm DIN EN 12350-5 August 2009. *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5-8:2009)*
- [DIN EN 12390-2] Norm DIN EN 12390-2 Juni 2001. *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen (DIN EN 12390-2-6:2001)*

- [DIN EN ISO 3274] Norm DIN EN ISO 3274 April 1998. *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (DIN EN ISO 3274-4:1998)*
- [DIN EN ISO 4287] Norm DIN EN ISO 4287 Oktober 1998. *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Berechnungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (DIN EN ISO 4287-10:1998)*
- [DIN EN ISO 4288] Norm DIN EN ISO 4288 April 1998. *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (DIN EN ISO 4288-4:1998)*
- [DKM03] DEHN, Frank ; KÖNIG, Gert ; MARZAHN, Gero: *Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen*. Berlin : Ernst & Sohn, 2003
- [Don06] DONAT, Horst: *Aerostatische Führungen und Luftlagerungen Berechnung, Konstruktion und Einsatz aerostatischer Führungen im Maschinen- und Präzisionsgerätebau*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2006
- [GLP02] GRAUBNER, Carl-Alexander ; LIEBERUM, Karl-Heinz ; PROSKE, Tilo: *Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton*. In: *Beton- und Stahlbau* (2002)
- [GR99] GRUBE, Horst ; RICKERT, Jörg: *Selbstverdichtender Beton - ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton*. In: *Beton: die Fachzeitschrift für Bau + Technik* (1999)
- [Hei09] HEIDELBERGCEMENT AG: Version:2009. http://www.heidelbergcement.com/de/de/country/service/glossar/Hydratation_Hwaerme.htm, Abruf: 21.10.2009. Online-Artikel
- [Hum51] HUMMEL, Alfred: *Das Beton-ABC: Schwerbeton Leichtbeton*. 11 Aufl. Berlin : Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1951
- [Jac02] JACKISCH, Utz-Volker: *Mineralguss für den Maschinenbau: Herstellung und Eigenschaften eines modernen Werkstoffes für hochpräzise Maschinengestelle*. Landsberg/ Lech : verlag moderne industrie, 2002
- [KB03] KORDTS, Stefan ; BREIT, Wolfgang: *Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton*. Düsseldorf : Beton 53 (2003) 11, 2003
- [Kra93] KRAUSE, Werner: *Konstruktionselemente der Feinmechanik*. 2 Aufl. München - Wien : Carl Hanser Verlag, 1993
- [LL09] LOSER, R. ; LEEMANN, A.: *Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete*. In: *Materials and structures: research and testing* (2009)

- [Mil95] MILBERG, Joachim: *Werkzeugmaschinen - Grundlagen Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen*. 2 Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1995
- [New09a] NEW WAY AIR BEARINGS: Version: 2009. <http://www.newwayairbearings.com/>, Abruf: 23.11.2009. Homepage
- [New09b] NEW WAY AIR BEARINGS: *Air Bearing Flat Round 200mm - S1020001*. Version: 2009. <http://www.newwayairbearings.com/Air-Bearings-Flat-Round-200mm>, Abruf: 16.10.2009. Produktinformationen
- [New09c] NEW WAY AIR BEARINGS: *FAQ-A GENERAL AIR BEARING QUESTIONS*. Version: 2009. <http://www.newwayairbearings.com/Default.aspx?DN=74da6300-f8e0-433a-966e-911452766c1e>, Abruf: 09.10.2009. Online-Beitrag
- [New09d] NEW WAY AIR BEARINGS: *Flat Round Air Bearing Line Brochure*. Version: 2009. http://www.newwayairbearings.com/adx/asp/adxGetMedia.aspx?DocID=532,147,138,45,15,12,3,1,Documents&MediaID=4638&Filename=new_way_line_brochure_air_bearings_flat_round_nwab-08-035-v03-2009-02-27.pdf, Abruf: 11.10.2009. Produktinformationen
- [New09e] NEW WAY AIR BEARINGS: *Orifice vs. Porous Media Air Bearings*. Version: 2009. <http://www.newwayairbearings.com/Technical-Report-1-Orifice-vs.-Porous-Media-Air-Bearings>, Abruf: 06.10.2009. Online-Artikel
- [OEL09] OELZE PRÄZISIONS- MESSZEUGFABRIK GMBH: Version: 2009. <http://www.oelze-praezision.de/konstruktionsmerkmale.htm>, Abruf: 07.09.2009. Online-Beitrag
- [Per07] PEREYRA, Maria-Noel: *Querdehnung von Selbstverdichtendem Beton*, Technische Universität, Dissertation, 2007
- [Pet09] PETZOLDT, Franziska: *Präzisionsbearbeitung*, Technische Universität, Vorlesungsskript, 2009
- [Pil09] PILKINGTON HOLDING GMBH: *Das Floatverfahren*. Version: 2009. <http://www.pilkington.com/europe/germany/german/building+products/pilkington4architects/processes/float+process/default.htm>, Abruf: 09.10.2009. Online-Beitrag
- [Rei09a] REITZ NATURSTEINTECHNIK: Version: 2009. <http://www.reitz-natursteintechnik.de/de/sites/material.php>, Abruf: 07.09.2009. Online-Beitrag

- [Rei09b] REITZ NATURSTEINTECHNIK: *Granit für höchste Genauigkeit*. Version: 2009. http://www.reitz-natursteintechnik.de/de/downloads/aktuelles/ke08_03_058.pdf, Abruf: 19.09.2009. Online-Artikel
- [Sch07] SCHENK, Christoph: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an ebene aerostatischen Gaslagerelementen unter Hochvakuumbedingungen*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2007
- [SCH09a] SCHOTT TECHNICAL GLASS SOLUTIONS GMBH: Version: 2009. <http://www.schott.com/borofloat/german/production/index.html>, Abruf: 09.10.2009. Online-Beitrag
- [SCH09b] SCHOTT TECHNICAL GLASS SOLUTIONS GMBH: Version: 2009. <http://www.schott.com/borofloat/german/attribute/chemical/index.html>, Abruf: 10.10.2009. Online-Beitrag
- [TET09a] TETRA GESELLSCHAFT FÜR SENSORIK, ROBOTIK UND AUTOMATION MBH: Version: 2009. http://www.tetra-ilmenau.de/index.php?option=com_joomgallery&func=detail&id=238&Itemid=12&lang=de#jooming, Abruf: 07.09.2009. Online-Beitrag
- [TET09b] TETRA GESELLSCHAFT FÜR SENSORIK, ROBOTIK UND AUTOMATION MBH: Version: 2009. http://www.tetra-ilmenau.com/index.php?option=com_joomgallery&func=detail&id=237&Itemid=12&lang=de#jooming, Abruf: 07.09.2009. Online-Beitrag
- [Tho09] THOME PRÄZISION GMBH: Version: 2009. <http://thome-praezision.de/deu/praezisionsgranitteile-messplatten.html>, Abruf: 07.09.2009. Online-Beitrag
- [Tön95] TÖNSHOFF, Hans K.: *Werkzeugmaschinen: Grundlagen*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1995
- [Utz09] UTZ-VOLKER JACKISCH AND JOACHIM ROCHAU: *µm-genau Gestelle*. Version: 2009. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=5156&pk=529>, Abruf: 20.09.2009. Online-Beitrag
- [Wal97] WALTHER, René: *Bauen mit Beton: Einführung für Architekten und Bauingenieure*. Berlin : Ernst und Sohn, 1997
- [WB06] WECK, Manfred ; BRECHER, Christian: *Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung*. 8 Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006
- [Wes93] WESCHE, Karlhans: *Baustoffe für tragende Bauteile Band 2: Beton, Mauerwerk*. 3 Aufl. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag GmbH, 1993

Abbildungsverzeichnis

1.1	(a) Planares Positioniersystem (PPS200) und (b) Läufercke des PPS200 der Firma <i>TETRA GmbH</i> , entnommen aus [TET09a, TET09b]	1
1.2	Abhängigkeit der Spalthöhe h von der Belastung und dem Speisedruck p_s eines Luftlagerelementes mit Durchmesser 200 mm, entnommen aus [New09b]	2
1.3	(a) Grundgestell mit integrierten Führungsflächen und (b) Grundgestell mit gesondertem Element für Führungsflächen	2
2.1	Übersicht der Verfahrensvarianten <i>Abformen</i> und <i>Einbetten</i> zur Schaffung von präzisen Führungsflächen auf einem hydraulisch gebundenem Betongestell . . .	8
2.2	Prinzipdarstellung des <i>direktes Einbetten</i> mit Einlegeteil, welches (a) komplett eingebettet wird oder (b) über den Rand des HGB-Gestells hinausragt	8
2.3	Prinzipdarstellung des <i>2 Etappen Einbetten</i>	9
2.4	Prinzipdarstellung des <i>nachträglichen Abformens</i>	9
2.5	Prinzipdarstellung des <i>direkten Abformens</i>	10
2.6	Gestaltabweichungen 1., 2. und 3.-5. Ordnung nach DIN 4760 einer Führungsfläche mit Luftlagerelement	15
2.7	(a) Stirngefräste Oberfläche mit Spitzen und Tälern und (b) geläppte Oberfläche mit Tälern, entnommen aus [Pet09]	16
2.8	Vergleich der stofflichen Zusammensetzung von (a) Borosilicatglas und (b) Kalk-Natron-Glas, entnommen aus [SCH09b]	19
3.1	Sieblinien für Zugschlaggemische mit einem Größtkorn $D=31,5$ mm, entnommen aus [Wes93]	21
3.2	(a) Vergleich der Fließeigenschaften von SVB gegenüber Normalbeton und (b) zeigt den Vergleich der Stoffraumanteile von SVB gegenüber Normalbeton, entnommen aus [Bet09]	22
3.3	Stoffe zur Herstellung von SVB	24
3.4	Ausbreittisch mit Trichter	25
3.5	Befüllen des Trichters	25
3.6	Ruckartiges Hochziehen des Trichters	25
3.7	Durchmesser d zur Bestimmung des Setzfließmaßes	25
3.8	(a) Entschalen der Probekörper und (b) anschließende Feuchtlagerung für 6 Tage	26
3.9	Vergleich des Schwindens von Normalbeton an der Luft bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 35,% und 75 %, entnommen aus [Wes93]	29

3.10 Vergleich des Schwindmaß der verwendeten SVB-Rezeptur an den Prismen 1...3/6 und 4...6/6 bis zum 28. Tag nach der Herstellung	30
3.11 Vergleich des Schwindmaß verschiedener SVB-Rezepturen aus den vorangegangenen Studien von C.-A. GRAUBNER, H. GRUBE und R. LOSER, entnommen aus [GLP02, LL09, GR99]	30
3.12 Vergleich des Kriechmaßes in mm/m verschiedener SVB-Rezepturen aus den vorangegangenen Studien von GRAUBNER, LIEBERUM und PROSKE, entnommen aus [GLP02]	32
4.1 Prinzipdarstellung des Tastschnittgerätes als Messkreis mit allen mechanischen Komponenten, die mit dem Werkstück und der Tastspitze verbunden sind, entnommen aus [DIN EN ISO 3274]	36
4.2 Messgerät zur Oberflächenanalyse: <i>Perthometer M1</i> der Firma <i>Mahr GmbH</i>	36
4.3 Übersicht der 16 Messstrecken zur messtechnischen Erfassung des Mittenrauwerts R_a und der gemittelten Rautiefe R_z der Abformlehren sowie der darauf abgeformten SVB-Oberflächen	38
4.4 Graphische Darstellung des gemessenen Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefe R_z der einzelnen Abformlehren vor dem Betonieren mit SVB	39
5.1 Gusschalung der <i>Bauhaus Universität Weimar</i> zum Betonieren der Probekörper für die experimentellen Untersuchungen	43
5.2 Universalprüfmaschine <i>TIRA test 28100</i> der <i>Bauhaus Universität Weimar</i> für die Haftverbunduntersuchungen mit eingespanntem Probekörper	44
5.3 (a) Auftragen des Haftzugklebers auf den Zugstempel, (b) Andrücken des Zugstempels auf den Probekörper und (c) Probekörper mit angeklebten Zugstempeln an beiden Seiten	45
5.4 Lufteinschluss zwischen den Grenzflächen der Abformlehre Kalk-Natron-Glas und dem SVB im Probenalter von sieben Tagen	47
5.5 Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,245 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,24 \mu\text{m}$ der eingesetzten Abformlehre aus Gabbro „ <i>Nero Impala</i> “ mit eingezeichneter mittlerer Rautiefe R_0 und der zulässigen Spitzenhöhe von $2,5 \mu\text{m}$	52
5.6 Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,188 \mu\text{m}$ und $R_z = 1,59 \mu\text{m}$ der eingesetzten Abformlehre aus Gabbro mit eingezeichneter mittlerer Rautiefe R_0 und der zulässigen Spitzenhöhe von $2,5 \mu\text{m}$	52
5.7 Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro „ <i>Nero Impala</i> “. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von (a) zwei Tagen und (b) sieben Tagen	53
5.8 Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf (a) Borosilicatglas und (b) Kalk-Natron-Glas. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von sieben Tagen.	54

5.9	Graphischer Vergleich der Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen und der eingesetzten Abformlehren mit Markierung für die zulässigen Grenzen des Luftlagerelementes	56
5.10	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,188$ μ m und $R_z = 1,59$ μ m der eingesetzten Abformlehre Gabbro „Nero Impala“, erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	57
5.11	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,290$ μ m und $R_z = 2,12$ μ m der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	57
5.12	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 1,25$ mm mit $R_a = 6$ nm und $R_z = 50$ nm der eingesetzten Abformlehre Borosilicatglas, erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i> .	58
5.13	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,183$ μ m und $R_z = 2,05$ μ m der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas (Nr. 1), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	58
5.14	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,188$ μ m und $R_z = 1,59$ μ m der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas (Nr. 1), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	59
5.15	(a) Läppen der abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro (Trennung im Alter von 2 Tagen) und (b) Polieren der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro (Trennung im Alter von 2 Tagen)	60
5.16	Graphischer Vergleich der Mittenrauwerte R_a und der gemittelten Rautiefen R_z der nachbearbeiteten SVB-Oberflächen und der eingesetzten Abformlehre	61
5.17	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,456$ μ m und $R_z = 4,10$ μ m der geläppten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	62
5.18	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,149$ μ m und $R_z = 1,52$ μ m der polierten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von zwei Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	63
5.19	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6$ mm mit $R_a = 0,776$ μ m und $R_z = 5,69$ μ m der polierten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ (Trennung im Alter von sieben Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	63
5.20	Gegenüberstellung von zwei abgeformten SVB-Oberflächen auf Gabbro „Nero Impala“ mit (a) PTFE- und (b) Wachspolitur-Beschichtung. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von einem Tag.	66
5.21	Gegenüberstellung von drei abgeformten SVB-Oberflächen auf Borosilicatglas mit (a) Aquapel-, (b) PTFE- und (c) Resist-Beschichtung. Die Trennung von Abformlehre und SVB-Probekörper erfolgte im Alter von einem Tag.	66
5.22	Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der zweiten Versuchsreihe und der Abformlehren	68

5.23	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,723 \mu\text{m}$ und $R_z = 5,51 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Gabbro „Nero Impala“ mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	69
5.24	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,639 \mu\text{m}$ und $R_z = 3,77 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit Aquapel-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	70
5.25	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 1,545 \mu\text{m}$ und $R_z = 7,92 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit Aquapel-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	70
5.26	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 0,850 \mu\text{m}$ und $R_z = 6,37 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	71
5.27	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 1,359 \mu\text{m}$ und $R_z = 8,27 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit PTFE-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	71
5.28	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 1,615 \mu\text{m}$ und $R_z = 10,9 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Kalk-Natron-Glas mit Resist-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	72
5.29	Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n = 5,6 \text{ mm}$ mit $R_a = 1,218 \mu\text{m}$ und $R_z = 7,92 \mu\text{m}$ der abgeformten SVB-Oberfläche auf Borosilicatglas mit Resist-Beschichtung (Trennung im Alter von einem Tagen), erstellt mit dem <i>Perthometer M1</i>	72
5.30	In dieser Abbildung sind die messtechnisch erfassten Zugfestigkeiten der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (mit Trennmittel) gegenübergestellt. Aus jeder Variante wurde jeweils der Maximalwert, der Minimalwert und der Mittelwert heraus gestellt.	74
5.31	In den beiden Diagrammen sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Auf der Ordinate sind die gemessenen Zugfestigkeiten und auf der Abszisse jeweils die messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a sowie die gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen dargestellt. Die gestrichelten roten Linien markieren die geforderten Oberflächenkennwerte der Hersteller von Luftlagerelementen.	76

Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich der Materialeigenschaften verschiedener Gestellwerkstoffe	3
2.1	Vergleich der Vor- und Nachteile der Verfahren <i>Einbetten</i> und <i>Abformen</i>	10
2.2	Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften zum <i>direkten Abformen</i> aus der Patentrecherche	13
2.3	Vergleich der Vor- und Nachteile von Werkstoffen aus den vier Werkstoffgruppen für die Eignung als Abformlehre für das <i>direkte Abformen</i>	18
3.1	Mechanische Eigenschaften von SVB im Vergleich mit weiteren Gestellwerkstoffen Normalbeton und Gabbro	27
3.2	Thermische Eigenschaften von SVB im Vergleich mit weiteren Gestellwerkstoffen Normalbeton und Gabbro	28
3.3	Vergleich des Schwindens des SVB mit vorangegangenen Untersuchungen [GLP02, LL09, GR99]	31
4.1	Wahl der Einzelmessstrecken l_n und Grenzwellenlänge λ_c nach DIN EN ISO 4288, entnommen aus [DIN EN ISO 4288]	37
4.2	Mittelwerte des Mittenrauwert R_a und der gemittelte Rautiefe R_z der Abformlehren zur Bestimmung der Einzelmessstrecke l_r nach DIN EN ISO 4288	38
5.1	Übersicht der messtechnisch erfassten Zugfestigkeiten zwischen den Abformlehren und dem SVB der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) . . .	46
5.2	Übersicht der eingesetzten Stoffe, die auf der Oberfläche der Abformlehren als Trennschicht fungieren	48
5.3	Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) und der eingesetzten Abformlehren	55
5.4	Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der Versuchsreihe SVB-Abformlehre (ohne Trennmittel) vor und nach deren Bearbeitung	61
5.5	Vergleich der Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der abgeformten SVB-Oberflächen der zweiten Versuchsreihe und der Abformlehren	67
A.1	Übersicht der verwendeten deutschen und englischen Schlagwörtern bei der Patentrecherche zum <i>Abformen</i>	XCIII

A.2	Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften zum <i>Abformen</i> und <i>Einbetten</i> aus der Patentrecherche (Teil 1) . .	XCIV
A.3	Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften zum <i>Abformen</i> und <i>Einbetten</i> aus der Patentrecherche (Teil 2) . .	XCv
C.1	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Gabbro „ <i>Nero Impala</i> “ und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)	CXII
C.2	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Gabbro „ <i>Nero Impala</i> “ und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 2)	CXIII
C.3	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Kalk-Natron-Glas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)	CXIV
C.4	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Kalk-Natron-Glas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 2)	CXV
C.5	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Borosilicatglas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)	CXVI
C.6	Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Borosilicatglas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 2)	CXVII
E.1	Übersicht der Literaturstellen die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden .	CXXIV

Anhang A – Patentrecherche

Tabelle A.1: Übersicht der verwendeten deutschen und englischen Schlagwörtern bei der Patentrecherche zum *Abformen*

Deutsch	Englisch
- Führungsfläche	- SCC
- Rauheit	- casting
- Ebenheit	- concrete
- HGB	- guide
- Beton	- surface
- abgeformen	- flatness
- direkt	- precision
- SVB	
- Luftlagerelement	
- präzision	

Tabelle A.2: Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften zum *Abformen* und *Einbetten* aus der Patentrecherche (Teil 1)

Nr.	Bezeichnung	IPC	Jahr	Art	Geschützter Inhalt	Bezug zum Thema	Abweichungen vom Thema
17	DE 37 42 698 C1	B23Q1/02	1989	Patentschrift	Verfahren zur Herstellung eines Maschinenbettes bestehend aus einem Basisteil aus Reaktionsharzbeton und einem Führungsleisten aufweisendem Tragelement	Führungsflächen durch Einbetten von Metalleisten in Beton, Vermeidung von Krümmungen der Führungsleisten infolge von Betonschwund	Verwendung von Reaktionsharzbeton; Führungsleisten auf Tragelement, nicht direkt in Beton eingebettet
18	EP0405158A1	B23Q0001	1989	Patentanmeldung	Zwischenständer für Spinnereimaschinen aus Reaktionsharzbeton mit eingegossenen Befestigungsmitteln	passgenau eingegossene Befestigungselemente im Beton	Verwendung von Reaktions-harzbeton; Verdichten der Betonform durch Rütteln; keine Realisierung von Funktionsflächen
19	DE 41 35 370 C1	F16M9/00	1991	Patentschrift	Eingießeil für Maschinenbett aus Beton zur Schwingungsdämpfung und Befestigung von Lagerelementen	Einbetten von Funktionselementen in Beton	Lagerelemente nicht direkt in Beton eingebettet, sondern mit Verbindungselement verschraubt
20	EP 00 735 948 B1	B29C67/24	1994	Patentschrift	Verfahren für die Herstellung von Maschinenbauteilen aus Mineralguss, insbesondere von Pumpengehäusen, durch Gießen von Beton in eine beheizte, vibrierende Form	Gießen monolithischer Betongehäuse mit Eingießteilen	für Pumpengehäuse, Verwendung von Rüttelbeton, keine Ansprüche an Präzision
21	EP0714729B1	B23Q0001	1994	Patentschrift	Spindelkasten für Drehmaschinen mit eingebetteten Metallelementen zur Befestigung von Lagerelementen und Medienzuführungen	Einbetten von Funktionselementen in Beton	keine Realisierung von Funktionsflächen durch Abformen oder Einbetten; Lagerflächen aufgeklebt; keine Angabe zur Rauheit, Ebenheit der Oberfläche
22	DE 298 12 506 U1	F16M5/00	1998	Gebrauchsmuster	Maschinenfundament einer Laserbearbeitungsmaschine aus Beton, bestehend aus vorgefertigten Modulen, die Verbindungselemente zu anderen Modulen und zu Führungsschienen aufweisen	Verbindungselemente in Beton eingebettet	Verwendung von Rüttelbeton; Führungsschienen nicht durch Abformen oder Einbetten in Beton hergestellt
23	DE 298 06 862 U1	Eo4B1/38	1998	Gebrauchsmuster	Verankerungsvorrichtung zum Einbetten in Beton, an dem kraftübertragende Bauteile angebracht sind	Einbetten von Funktionselementen in Beton	nicht zum Anbringen von Führungselementen; kein direktes Einbetten von Führungselementen
24	DE 199 05 002 A1	B23K/08	2000	Offenlegungsschrift	Maschinengestell für eine Lasermaterialbearbeitungsanlage aus Mineralguss-Metall-Verbund	Metallteile zur Befestigung weiterer Maschinenteile in Beton eingegossen	keine Realisierung von Führungsflächen; keine Angabe zur Oberflächenbeschaffenheit des Betons; keine Angabe zur Fertigung des Gestells
25	DE 199 38 806 A1	C04B32/00	2001	Offenlegungsschrift	Verfahren zur Herstellung Oberflächenveredelte Betonsteine, wobei der Betonstein mit einer Polymerkunststeinschicht eine untrennbare Verbindung eingeht	Betonoberfläche natursteinähnlich, stabil, weitgehend chemikalienresistent, nicht porös, gegen Verschmutzung und Ölflecken unempfindlich	für Gartenbau, Pflastersteine, Tischplatten für den Außenbereich, Schwimmbadbau, Fassadenbau; keine Angabe über Rauheit, Ebenheit
26	DE 101 33 607 A1	B28B11/24	2001	Offenlegungsschrift	Verfahren zur Herstellung eines präzisen Betonfertigteils, insbesondere von Schwellen für schienengeführte Fahrzeuge, durch Gießen des Betons in eine Schalung und anschließendes Nachbearbeiten der funktionsrelevanten Stellen	Gießen eines Betonteils mit präzisen Toleranzen	Verwendung von Faserbeton; Anwendung für Schienenschwellen oder Fahrbahnplatten; Nachbearbeitung der Funktionsstellen
27	DE 100 23 636 C1	F16S5/00	2001	Patentschrift	Maschinenteile und Werkstücke aus verschiedenartig kombinierten Polymerbeton-bzw. Mineral-gussorten, hergestellt durch Angießen und Verkleben	Herstellung von Maschinenteilen durch Angießen zweier verschiedener Betonsorten	Verkleben der Maschinenteile, keine Anforderungen an die Rauheit, Ebenheit der Oberfläche
28	DE 100 41 218 A1	E01C5/00	2002	Offenlegungsschrift	Herstellung von künstlichem Bruchsteinpflaster, bestehend aus unregelmäßig angeordneten Bruchsteinen, umhüllt von einer Betonschicht	Einbetten von Naturstein in Beton	keine Ansprüche an Präzision; keine Verwendung im Maschinenbau
29	WO 2005/025836 A1	B29C59/02	2004		Verfahren zur Herstellung von Funktionsoberflächen aus thermoplastischen Kunststoffen	Abformung eines Kunststoffes durch Erhitzen, Eindrücken eines Formelementes, Erstarren des Kunststoffes	Verwendung von thermo-plastischen Kunststoffen; keine Anwendung im Maschinenbau genannt; keine Angaben zur Rauheit, Ebenheit der Oberflächen
30	WO 2004/009308 A2	B28B19/00	2004	Patentschrift	Verfahren und Maschine zur Fertigung eines Verbundsteines bestehend aus einer Natursteinplatte, Verbundbeton und Rüttelbeton	Einbetten einer Natursteinplatte in Beton mit maximalem Haftverbund	keine Angaben über Verwendung des Verbundsteines; keine Angaben über Oberflächenbeschaffenheit der Steinplatte; Verwendung von Rüttelbeton
31	DE102005003153A1	B23Q0001	2005	Patentschrift	Maschinengestell aus Reaktionsharzbeton mit Linearwälzführung als Eingusselement	eingebettetes Führungselement in Beton	Verwendung von Reaktionsharzbeton; keine Ansprüche auf Präzision
32	DE 10 2007 021 121 A1	B25H 1/02	2008	Offenlegungsschrift	Arbeits Tisch und Verfahren zu seiner Herstellung; bestehend aus Tischplatte und Stützelementen; 4mm Nutschicht aus Epox ydharz auf Tisch aufgetragen; Tischplatte mit integriertem Versorgungskanal; 2 maliges Betonieren, erst Stützs chicht mit Armierung, dann Nutschicht	Arbeits Tisch zum Teil aus Beton, großflächig, Intergration von Funktionselementen, Arbeitsfläche aus Epox ydharz mit geringer Rauhigkeit	Sandwichbauweise; Verwendung von Epox ydharzbeton; keine Wertangabe von Rauheit, Ebenheit
33	DE 202 00 900 0489 U1	B23K0037-04	2009	Gebrauchsmuster	Arbeits tische mit und für Tischplatten aus Polymerbeton, als Auflage- und Aufspannplatte eines Mod ularen Klemmsystems	Funktionselemente, insbesondere rohrförmige Passbuchsen maßgenau in Beton eingebettet	keine Angabe zur Herstellung der Arbeitsplatte; keine Angabe zur Rauheit, Ebenheit der Arbeitsplatte; Arbeitsplatte aus Polymerbeton


Tabelle A.3: Übersicht der gefundenen Patentschriften, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften zum *Abformen* und *Einbetten* aus der Patentrecherche (Teil 2)

Nr.	Bezeichnung	IPC	Jahr	Art	Geschützter Inhalt	Bezug zum Thema	Abweichungen vom Thema
1	EP0253930A1	B23Q0001	1986	Patentschrift	Verfahren zur Herstellung von Maschinenteilen mit präzisen Oberflächen zur Gleitlagerung durch Abformen von Beton auf Stahl oder Granit; Anschließend Schleifen der abgeformten Betonoberfläche auf Maß, oder Einbetten von Granit, Marmor und Quarz	Realisierung von Funktionsflächen durch Abformen und Einbetten von Beton; Verwendung von Granit als Form- und Abformwerkstoff	keine Angabe zur verwendeten Betonart; Möglichkeit der Nachbearbeitung der Funktionsflächen
2	DE 197 14 736 A1	B29C39/18	1998	Offenlegungsschrift	Verfahren zur Herstellung von Maschinenteilen aus kaltgehärtetem Mineralguss mit absolut luftblasenfreier Oberfläche und geringer Ebenheitsabweichung, beliebig strukturierbar durch Baukastenprinzip	Herstellung von präzisen Flächen durch Gießen von Beton in eine Holz- oder Metallschalung; Ebenheitsabweichung von 0,03mm auf einer Fläche von 500mm x 500mm	Epoxydharzschicht an den Formwänden zur Herstellung der Präzisionsoberfläche; keine Angabe zur Verwendung der Oberfläche; keine Angaben zum Einsatzzweck; keine Angabe zur Oberflächenrauheit
3	DE 102 51 228 C1	B23Q1/01	2002	Patentschrift	Maschinensockel mit Führungsflächen und Verfahren zu dessen Herstellung; direktes Abformen von Beton zur Schaffung von Führungsflächen zur Gleitlagerung von beweglichen Maschinenteilen	Führungsflächen durch unmittelbar abgeformte Oberflächen des Polymerbetons ohne Nachbearbeitung geschaffen; Führungsflächen für Luftlager ohne Nachbearbeitung; Abformlehre: polierte Stein-/Granitplatte	Verwendung von Polymerbeton; keine Zahlenwertangabe von Rauheit bzw. Ebenheit der Oberfläche
4	DE 103 00 754 A1	E01C 5/00	2004	Offenlegungsschrift	einschichtiger Formstein aus SVB mit einer Oberfläche geringer Rauigkeit	Verwendung einer einzigen Schicht aus SVB; äußere Form beliebig gestaltbar; Oberfläche hat geringe Rauigkeit; wasserdichte Schalung aus Holz, Kunststoff oder Metall	Luftporen an der Oberfläche; keine Anwendung im Maschinenbau genannt; Keine Wertangaben der Rauheit, Ebenheit benannt; keine Angabe zur Herstellung der Oberfläche benannt
5	EP 1 923 185 A1	B28B7/22	2006	Patentanmeldung	Verfahren zur Fertigung eines einstückigen Fertigteils aus SVB, wobei der SVB mittels Druckschläuchen von unten in die Schalung eingepresst wird	Herstellung eines Fertigteils aus SVB	keine Angaben über die zu betonierenden Fertigteile; keine Schaffung von Präzisionsflächen durch direktes Abformen; keine Integration von Funktionslementen
6	WO2009037112A3	B23Q0001	2007	Patentschrift	Werkzeugmaschinengestell aus hochfestem bzw. ultrahochfesten Beton mit Führungselementen zur beweglichen Lagerung des Gestells	Betongestell mit Führungselementen	keine Angabe zur Herstellung des Gestells; keine Angabe zur Realisierung der Führungselemente; Verwendung von ultrahochfesten Beton mit Fasern; Führungsflächen werden nicht direkt abgeformt
7	DE2256029C3	B23B0017	1972	Patentschrift	Drehmaschinenbett aus Beton mit aufgeklebten Führungsbahnen aus Metall	-	Führungsbahnen weder eingebettet noch abgeformt; keine Angabe zu verwendeter Betonart
8	DE2521036C3	B23Q0001	1975	Patentschrift	Werkzeugmaschinenbett aus Beton, bestehend aus mehrerend durch Zuganker verbundenen Blöcken mit Anschlusselementen für Führungsschienen	Anschlusselemente für Führungsschienen in Beton eingebettet	Führungsschienen weder eingebettet noch abgeformt
9	DE2603637B2	B23Q0001	1975	Auslegeschrift	Drehmaschinenbett aus Beton mit einem Führungsbahnen entahltenen Tragkörper	Führungsbahnen in Beton eingebettet	keine Angabe zur verwendeten Betonart; kein Anspruch auf Präzision
10	DD 00133201 A1	B23Q 1/02	1977	Patentschrift	Führungsflächen an Werkzeugmaschinen und Verfahren zu ihrer Herstellung: Abformen von Terrazzo und Beton; Schleifen des Terrazzo auf Maß	Führungsflächen durch Abformen von Mineralguss unten in Gießform; Betonieren in 2 Schritten: erst Befüllen des unteren Teils der Form mit Terrazzo, danach Auffüllen mit Beton	Herstellung der Führungsflächen durch Nachbearbeitung; Verwendung von Terrazzo; intensives Verdichten der Form
11	DE2743396A1	B23B0017	1979	Offenlegungsschrift	Maschinenständer für Schleif- und Messmaschinen aus kunststoff-gebundenem Beton mit eingegossenen Führungsflächen aus Metall	Einbetten von Führungselementen aus Metall	Verwendung von Polymerbeton; keine Angabe von Rauheit bzw. Ebenheit der Oberfläche; keine Angabe zum Herstellungsverfahren
12	EP0046272B1	B23Q0001	1980	Patentschrift	Verfahren zur Herstellung von Maschinenständern aus Polymer-beton mit Metalleinsusteilen, wobei das Gemisch in eine Eisen-konstruktion gegossen wird	Eingießen von Metallteilen in Beton	keine Angabe zur Verwendung der Eingießteile; Verwendung von Polymerbeton; keine Ansprüche auf Präzision
13	EP0054276A1	B23Q0001	1981	Patentanmeldung	Maschinenständer für Werkzeug-maschinen aus synthetischem Beton mit als verlorene Schalung dienender Blechhaut	über Kopf Gießen eines Betongestells mit eingebetteten Metallteilen	keine Realisierung von Funktions-flächen; keine Verwendung von SVB
14	DE3125681C2	G01B0001	1981	Patentschrift	Koordinatenmessmaschine mit einem Grundgestell aus Kunstharzbeton mit eingebetteten Stahlführungen oder eingebetteten Granitplatten	in Beton eingebettete Führungsschienen aus Stahl und Messplatten aus Granit	Verwendung von Kunstharzbeton
15	DE 3626929 A1	B23Q1/02	1988	Offenlegungsschrift	Werkzeugmaschinenbett aus Beton, bestehend aus einem vorgespannten Tragkörper, an dem Führungselemente befestigt sind	Ziel: höhere statische & dynamische Steifigkeit des Maschinengestells; Ausnutzen der thermischen Vorteile von Beton	Funktionsflächen und -Elemente an Tragelement befestigt, nicht direkt in Beton eingebettet oder abgeformt
16	DE 38 17 458 A1	E04C3/20	1988	Offenlegungsschrift	Bauteil aus Mineralguss, insbesondere eine Maschinengrundplatte, in der Elemente zur Bewehrung, zur Aufnahme von Zug-/Druckspannungen eingebettet sind	Einbetten von Funktionselementen in Beton	Keine Angabe zur Oberflächenbeschaffenheit des Betons; keine Realisierung von Führungsflächen

Anhang B – Prüfpläne Materialeigenschaften

Herstellung SVB	
-----------------	--

1. Verantwortlicher	Bernau, René
2. Verantwortlicher	Berg, Marius

	Datum	Name	Unterschrift
Erstellung	24.08.2009	René Bernau	


Nr. 1	Komponenten
a	Gesteinskörnung 2/8 (Kies)
b	Gesteinskörnung 0/2 (Sand)
c	Zement (CEM III)
d	Mehlkorn (Kalksteinmehl)
e	Wasser
f	Fließmittel (Sika Viskokrete 2600)
g	Polymerdispersion

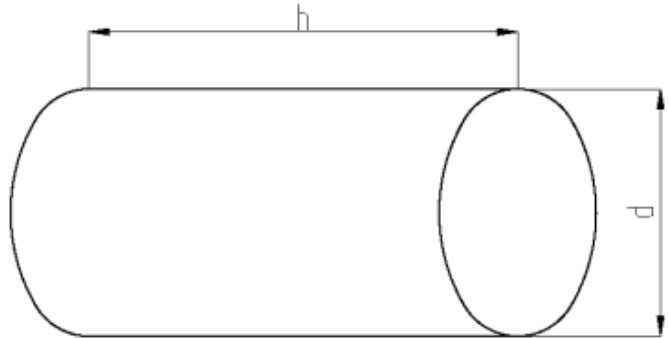
Nr. 2	Mischen		Dauer
Lfd. Nr.	Komponente	Durchführung	
1	a, b, c	Gesteinskörnung (a, b) sowie 1/3 Wasser (e) in den Mische geben und mischen	30s
2	c, d	Mehlkorn (d) und Zement (c) in den Mischer geben und mischen	15s
3	g	Polymerdispersion (g) unter mischen hinzugeben	15s
4	e	Restliche Wasser (e) unter mischen hinzugeben	15s
5	-	mischen	30s
6	f	Fließmittel (f) und mischen hinzugeben	60s

Nr. 3	Betonieren
Lfd. Nr.	Durchführung
7	Schalung mit Schalungsöl einstreichen
8	Selbstverdichtenden Beton mit Hilfe eine Handschippe in die Schalung füllen
9	überschüssigen Selbstverdichtenden Beton abstreifen (Oberseite Schalung u. SVB müssen bündig sein)
10	Schalung zum aushärten lager

Spaltzugfestigkeit

1. Verantwortlicher	Bernau, René
2. Verantwortlicher	Berg, Marius

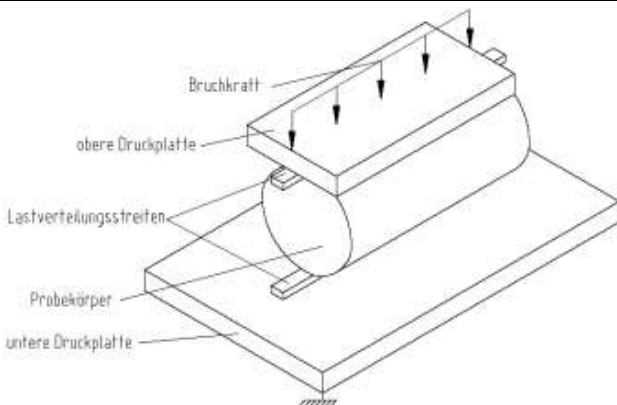
	Datum	Name	Unterschrift
Erstellung	24.08.2009	René Bernau	

Nr. 1	Prüfkörper gießen	Richtlinie
Anzahl der Proben	3. Stk	DIN 1048-5
Abmaß der Probekörper	d [mm]	DIN 1048-5
	150	
	h [mm]	DIN 12390-1
	300	
		
SVB Komponenten und Ablauf des Betonierens siehe Blatt „Herstellung Selbstverdichtender Beton“		

Nr. 2	Prüfkörper aushärten	Richtlinie
Dauer	$(24 \pm 2)h$	DIN 12390-2
Forderung	Umgebungstemperatur	Soll [°C] (20 ± 2) Ist [°C] 20,4
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%] (65 ± 5) Ist [%] 60,2

Nr. 3	Prüfkörper lagern	Richtlinie
Dauer	28 Tage	DIN 12390-2 DIN 1048-5
Forderung	Lagerungsort	Wasser x Trocken x
	Wasserbad	Dauer 7 Tage
	Wassertemperatur	Soll [°C] (20 ± 2) Ist [°C] 20,2
	Trocken	Dauer 21 Tage
	Lufttemperatur	Soll [°C] (20 ± 2) Ist [°C] 21,4
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%] (65 ± 5) Ist [%] 60,2
Bemerkung	Proben sind Gekennzeichnet mit: <ul style="list-style-type: none"> - SVB TUI - Herstellungsdatum 2009-08-24 - Nummerierung 1...3 / 6 	

Nr. 4		Überprüfung Abmaße Prüfkörper						Richtlinie				
Forderung		<div>- zul. Abweichung A vom benannten Maß (d) $\pm 0,5\%$ - zul. Abweichung A vom benannten Maß (h) beträgt $\pm 5\%$ - Messung des Maß (h) an den beiden Enden, sowie in der Mitte und dann Bildung des Mittelwertes \bar{d}</div>						DIN 12390-1				
		d [mm]				h [mm]						
		Nr.	Soll	Ist	Ist \bar{d}	A [%]	Nr.			Soll	Ist	A [%]
		1/6	150	149,6	149,67	0,22	1/6			300	295,5	1,5
149,6												
149,8												
2/6	149,8	149,8		0,13	2/6	299	0,33					
	149,8											
	149,8											
3/6	149,6	149,67		0,22	3/6	297,2	0,93					
	149,7											
	149,7											

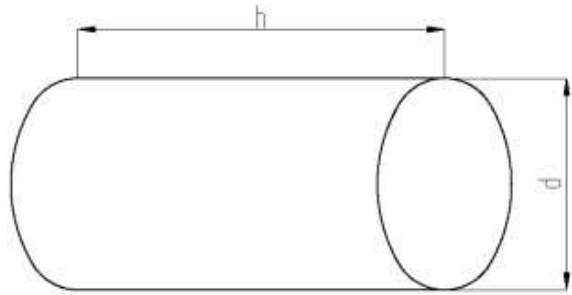
Nr. 5	Versuchsdurchführung	Richtlinie
Nr.	Schritte	DIN 1048-5
1	Probekörper in vorgesehene Prüfmaschine einsetzen	
2	Zwischen dem Probekörper und den Druckplatten der Prüfmaschine sind Lastverteilungstreifen entlang der Belastungsebene anzubringen	
3	obere Druckplatte langsam an den Probekörper anfahren und die Lastverteilungstreifen gleichmäßig anliegen	
4	die Last so steigern, dass die Spannung um $(0,05 \pm 0,02)N/mm^2$ je Sekunde steigt	
5	Prüfvorgang starten und nach Beendigung die Bruchkraft (Höchstlast) ablesen	
6	mit: F = Bruchkraft in [N] d = Durchmesser des Probekörpers in [mm] l = Länge des Probekörpers in [mm] Spaltzugfestigkeit: $\beta_{SZ} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l}$	
		DIN 12390-6

Nr. 6	Messwerte Prüfkörper		
Nr.	Masse [kg]	Bruchkraft [kN]	Spaltzugfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
1/6	11,342	206,5	2,972
2/6	11,726	270	3,837
3/6	11,453	212	3,034
	Mittelwert:	229,5	3,281

Statisches Elastizitätsmodul

1. Verantwortlicher	Bernau, René
2. Verantwortlicher	Berg, Marius

	Datum	Name	Unterschrift
Erstellung	24.08.2009	René Bernau	<i>René Bernau</i>

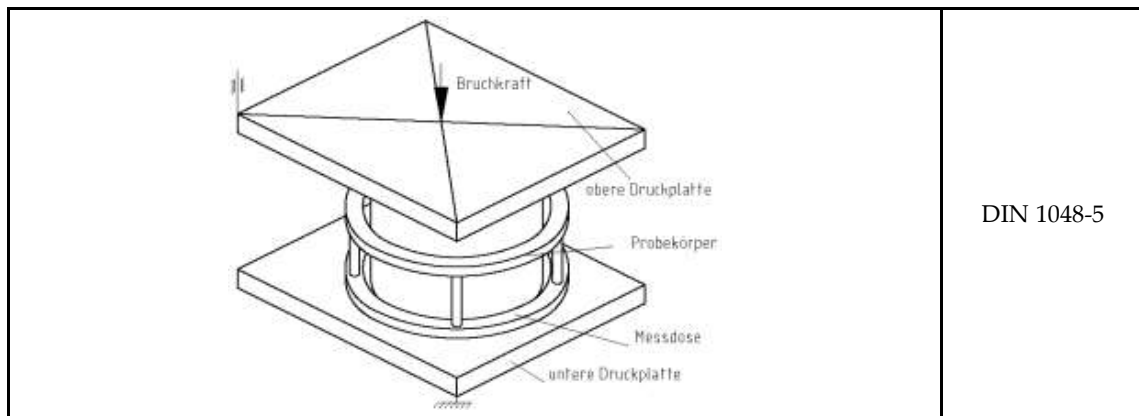
Nr. 1	Prüfkörper gießen		Richtlinie
Anzahl der Proben	3. Stk		DIN 1048-5
Abmaß der Probekörper	d [mm]	h [mm]	DIN 1048-5
	150	300	
			DIN 12390-1
SVB Komponenten und Ablauf des Betonierens siehe Blatt „Herstellung Selbstverdichtender Beton“			

Nr. 2	Prüfkörper aushärten					Richtlinie
Dauer	(24 ± 2)h					DIN 12390-2
Forderung	Umgebungstemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,4	DIN 12390-2
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	60,2	

Nr. 3	Prüfkörper lagern						Richtlinie
Dauer	27 Tage						DIN 12390-2 DIN 1048-5
Forderung	Lagerungsort	Wasser	x	Trocken	x		
	Wasserbad	Dauer		6 Tage			
	Wassertemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,2		
	Trocken	Dauer		21 Tage			
	Lufttemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	21,4		
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	60,2		
Bemerkung	Proben sind Gekennzeichnet mit: <div><div>- SVB TUI</div><div>- Herstellungsdatum 2009-08-24</div><div>- Nummerierung 4..6 / 6</div></div>						

Nr. 4		Überprüfung Abmaße Prüfkörper						Richtlinie	
Forderung		<div>- zul. Abweichung A vom benannten Maß (d) $\pm 0,5\%$ - zul. Abweichung A vom benannten Maß (h) beträgt $\pm 5\%$ - Messung des Maß (h) an den beiden Enden, sowie in der Mitte und dann Bildung des Mittelwertes \bar{d}</div>						DIN 12390-1	
d [mm]					h [mm]				
Nr.	Soll	Ist	Ist \bar{d}	A [%]	Nr.	Soll	Ist	A [%]	
4/6	150	149,9	149,87	0,09	4/6	300	298,1	0,63	
		150							
		149,7							
5/6		149,8	149,73	0,18	5/6		299	0,33	
		149,7							
		149,7							
6/6		149,8	149,83	0,14	6/6		297,6	0,8	
		149,8							
		149,8							

Nr. 5		Versuchsdurchführung		Richtlinie
Versuchsdurchführung	Nr.			DIN 1048-5
	1	Prüfkörper werden zentrisch in Prüfmaschine eingesetzt		
	2	obere Druckplatte der Prüfmaschine wird ausgerichtet, dass diese ganzflächig an die obere Druckfläche des Prüfkörpers anliegt		
	3	oberen Prüfspannung σ_o , soweit nicht festgelegt – soll etwa ein Drittel der Druckfestigkeit β_D sein		
	4	anlegen der Messdose (Messlänge 150 [mm]) an den Probekörper		
	5	anlegen der unteren Prüfspannung $\sigma_u \approx 0,5 N/mm^2$		
	6	Versuch mit einer Be- und Entlastungsgeschwindigkeit von $(0,5 \pm 0,2) N/mm^2$ je Sekunde durchgeführt		
	7	ablesen der unteren Spannung σ_u sowie der zugehörigen Dehnung ε_u		
	8	ablesen der unteren Spannung σ_o sowie der zugehörigen Dehnung ε_o		
	9	anschließend Bestimmung der Druckfestigkeit β der Probekörper (weicht die Druckfestigkeit um mehr 20% vom vorausgesetzten ab, sind diese zu vermerken)		
	10	E-Modul: $E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u}$ mit: σ_o = obere Prüfspannung [N/mm^2] σ_u = untere Prüfspannung [N/mm^2] ε_o = obere Dehnung ε_u = untere Dehnung		



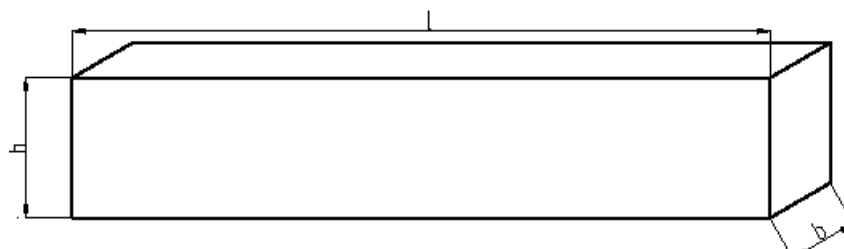
DIN 1048-5

Nr. 6	Messwerte Prüfkörper				
Nr.	σ_o [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	ε_o	ε_u	E_b
4/6	16,8	0,9	5,5E-4	5,7E-5	32,3
5/6	16,82	0,9	4,92E-4	4,08E-5	35,3
6/6	16,8	0,9	5,46E-4	4,98E-5	32,
				Mittelwert:	33,2

Biegezugfestigkeit

1. Verantwortlicher	Bernau, René
2. Verantwortlicher	Berg, Marius

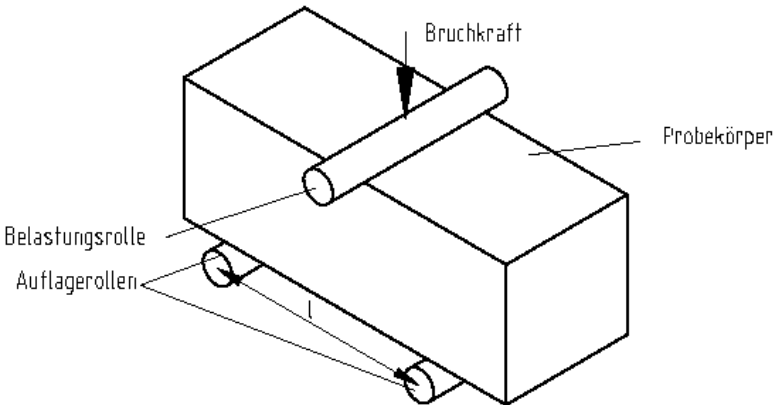
	Datum	Name	Unterschrift
Erstellung	24.08.2009	René Bernau	<i>René Bernau</i>

Nr. 1	Prüfkörper gießen			Richtlinie
Anzahl der Proben	3. Stk			DIN 1048-5
Abmaß der Probekörper	l [mm]	b [mm]	h [mm]	DIN 1048-5
	100	100	400	
				DIN 1048-5 DIN 12390-5
SVB Komponenten und Ablauf des Betonierens siehe Blatt „Herstellung Selbstverdichtender Beton“				

Nr. 2	Prüfkörper aushärten					Richtlinie
Dauer	(24 ± 2)h					DIN 12390-2
Forderung	Umgebungstemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,4	DIN 12390-2
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	61,4	

Nr. 3	Prüfkörper lagern						Richtlinie	
Dauer		27 Tage						DIN 12390-2 DIN 1048-5
Forderung	Lagerungsort	Wasser	x	Trocken	x			
	Wasserbad	Dauer		7 Tage				
	Wassertemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,2			
	Trocken	Dauer		21 Tage				
	Lufttemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	21,4			
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	60,2			
Bemerkung	Proben sind Gekennzeichnet mit: <div><div>-</div>SVB TUI</div> <div><div>-</div>Herstellungsdatum 2009-08-24</div> <div><div>-</div>Nummerierung 1...3 / 3</div>							

Nr. 4		Überprüfung Abmaße Prüfkörper								Richtlinie	
Forderung		- zul. Abweichung A vom benannten Maß (b, l) beträgt ±0,5%								DIN 12390-1	
l [mm]				b [mm]				h [mm]			
Nr.	Soll	Ist	A [%]	Nr.	Soll	Ist	A [%]	Nr.	Soll	Ist	A [%]
1/3	400	400	0	1/3	100	100,5	0,5	1/3	100	100,4	0,4
2/3		400	0	2/3		99,6	-0,4	2/3		100,5	0,5
3/3		400	0	3/3		99,5	-0,5	3/3		100,1	0,1

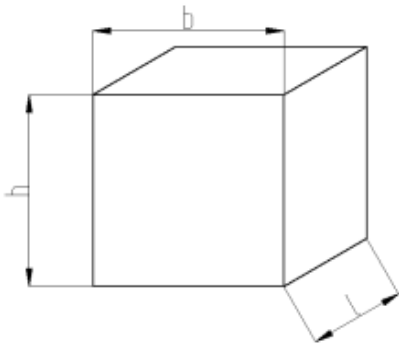
Nr. 5		Versuchsdurchführung								Richtlinie	
Versuchsdurchführung		Nr.									DIN 1048-5
		1	Last ist auf den Balken zu übertragen, dass die Lastrichtung senkrecht zur Einfüllrichtung liegt								
		2	Auflager- und Lastschneiden sollen Durchmesser von 20mm und 40mm haben und mindestens 10mm breiter als der Prüfkörper sein								
		3	auf den Lastschneiden sollen zwei gleich große Lasten $F/2$ angreifen								
		4	obere Druckplatte der Prüfmaschine wird so ausgerichtet, dass sie ganzflächig an der oberen Druckfläche des Probekörpers anliegt								
		5	Kolben der Prüfmaschine langsam auf den Prüfkörper fahren								
		6	Belastung so steigern, dass die Spannung je Sekunde um $(0,05 \pm 0,02) N/mm^2$ zunimmt								
		7	aus der erreichten Höchstlast ergibt sich die Biegezugfestigkeit								
		8	Biegezugfestigkeit: $\beta_{BZ} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$ mit: <div style="display: inline-block; vertical-align: top; margin-left: 10px;"> F = Bruchlast [N] l = Abstand zwischen den Auflagerrollen ($l=300$ [mm]) b = Breite des Probekörpers [mm] h = Höhe des Probekörpers [mm] </div>								
										DIN 1048-5 DIN 12390-5	

Nr. 6	Messwerte Prüfkörper		
Nr.	Masse [kg]	Bruchkraft [kN]	Biegezugfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
1/3	8,958	12,19	3,61
2/3	9,11	11,58	3,45
3/3	8,885	12,49	3,75
		Mittelwert:	3,6

Druckfestigkeit

1. Verantwortlicher	Bernau, René
2. Verantwortlicher	Berg, Marius

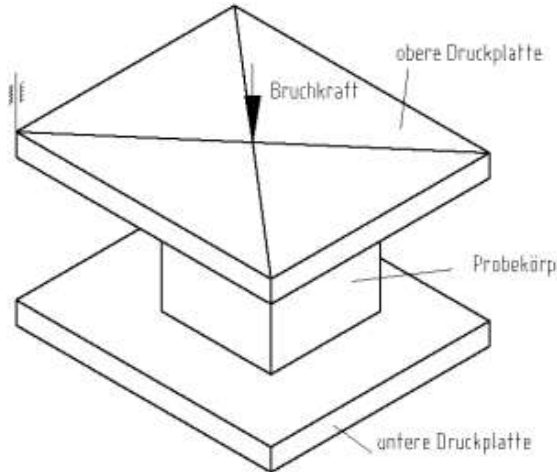
	Datum	Name	Unterschrift
Erstellung	24.08.2009	René Bernau	<i>René Bernau</i>

Nr. 1	Prüfkörper gießen			Richtlinie
Anzahl der Proben	3. Stk			DIN 1048-5
Abmaß der Probekörper	l [mm]	b [mm]	h [mm]	DIN 1048-5
	150	150	150	
				DIN 12390-1
SVB Komponenten und Ablauf des Betonierens siehe Blatt „Herstellung Selbstverdichtender Beton“				

Nr. 2	Prüfkörper aushärten					Richtlinie
Dauer	$(24 \pm 2)h$					DIN 12390-2
Forderung	Umgebungstemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,4	DIN 12390-2
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	60,2	

Nr. 3	Prüfkörper lagern						Richtlinie
Dauer	28 Tage						DIN 12390-2 DIN 1048-5
Forderung	Lagerungsort	Wasser	x	Trocken	x		
	Wasserbad	Dauer		7 Tage			
	Wassertemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	20,5		
	Trocken	Dauer		21 Tage			
	Lufttemperatur	Soll [°C]	(20 ± 2)	Ist [°C]	21,4		
	Luftfeuchtigkeit	Soll [%]	(65 ± 5)	Ist [%]	60,1		
Bemerkung	Proben sind Gekennzeichnet mit: <ul style="list-style-type: none"> - SVB TUI - Herstellungsdatum 2009-08-24 - Nummerierung 1...3 / 3 						

Nr. 4		Überprüfung Abmaße Prüfkörper						Richtlinie			
Forderung		- zul. Abweichung A vom benannten Maß (b, l, h) beträgt $\pm 0,5\%$						DIN 12390-1			
l [mm]				b [mm]				h [mm]			
Nr.	Soll	Ist	A [%]	Nr.	Soll	Ist	A [%]	Nr.	Soll	Ist	A [%]
1/3	150	150,3	0,2	1/3	150	150	0	1/3	150	150,2	0,15
2/3		150,3	0,2	2/3		150	0	2/3		150,2	0,15
3/3		150	0	3/3		150	0	3/3		150	0

Nr. 5	Versuchsdurchführung	Richtlinie
Nr.	Schritte	DIN 1048-5
1	Probekörper in vorgesehene Prüfmaschine einsetzen	
2	obere Druckplatte der Prüfmaschine an den Probekörper heranzufahren	
3	die gemessenen Abmaße der Probekörper in den Bedienelement der Prüfmaschine eingeben	
4	die Last so steigern, dass die Druckspannung um $(0,5 \pm 0,2)N/mm^2$ je Sekunde steigt	
5	Prüfvorgang starten und nach Beendigung die Bruchkraft (Höchstlast) ablesen	
6	Druckfestigkeit: $\beta_D = \frac{F}{A_{Re}}$	mit: F = Bruchkraft in [N] A = Druckfläche in [mm ²]
		DIN 1048-5 DIN 12390-3

Nr. 6		Messwerte Prüfkörper		
Nr.	Masse [kg]	Bruchkraft [kN]	Druckfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	
1/3	7,547	1298	57,57	
2/3	7,533	1265	56,11	
3/3	7,547	1381	61,38	
		Mittelwert:	58,35	

Anhang C – Messwerte Oberflächenanalyse

R_z der Abformlehren Gabbro „Nero Impala“ und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
	Messstrecke [mm]	5,6 mm															
	Messrichtung	X															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	-3%															
Abformlehre Gabbro	R _{ai} [µm]	0,149	0,400	0,183	0,245	0,070	0,107	0,475	0,078	0,084	0,037	0,095	0,169	0,073	0,090	0,150	0,097
	R _a Richtung [µm]	0,213															
	R _a [µm]	0,156															
	R _{zi} [µm]	2,40	4,77	2,97	2,24	1,13	1,54	4,93	1,22	1,33	0,60	1,23	2,55	1,08	0,77	2,27	0,94
	R _z Richtung [µm]	2,650															
	R _z [µm]	1,998															
	R _{zi} max [µm]	5,46	9,63	10,40	4,47	2,35	3,55	17,70	2,04	2,65	0,89	1,91	10,50	2,80	1,83	7,87	1,49
	R _z max Richtung [µm]	6,950															
	R _z max [µm]	5,346															
	Kalibriert	Ja															
SVB abgeformt auf Gabbro	Korrekturwert	0%															
	R _{ai} [µm]	0,811	0,252	0,290	0,173	0,794	0,304	0,784	0,440	0,569	0,897	0,604	0,663	0,290	0,305	0,575	0,333
	R _a Richtung [µm]	0,481															
	R _a [µm]	0,505															
	R _{zi} [µm]	5,26	1,73	2,12	1,24	4,57	2,72	5,44	3,66	3,20	5,05	3,76	4,81	1,84	1,94	4,46	2,05
	R _z Richtung [µm]	3,343															
	R _z [µm]	3,366															
	R _{zi} max [µm]	9,51	2,72	2,94	1,53	12,10	3,25	6,56	7,07	9,94	8,13	5,79	9,27	2,23	3,55	11,10	3,14
	R _z max Richtung [µm]	5,710															
	R _z max [µm]	6,177															
SVB abgeformt auf Gabbro	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	1%															
	R _{ai} [µm]	0,316	0,357	0,524	0,354	0,491	0,307	0,333	0,427	0,400	0,407	0,646	0,386	0,729	0,993	0,501	0,348
	R _a Richtung [µm]	0,389															
	R _a [µm]	0,470															
	R _{zi} [µm]	2,65	3,23	4,69	2,93	4,78	3,27	2,81	3,44	4,14	4,75	5,16	4,77	7,72	7,54	4,19	3,14
	R _z Richtung [µm]	3,475															
	R _z [µm]	4,326															
	R _{zi} max [µm]	3,14	4,39	7,57	4,05	7,92	5,14	4,12	5,66	6,89	7,81	7,26	6,87	12,70	12,80	10,30	4,36
	R _z max Richtung [µm]	5,249															
R _z max [µm]	6,936																
SVB abgeformt auf Gabbro	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	2%															
	R _{ai} [µm]	0,682	0,569	0,566	0,474	0,596	0,593	0,745	0,345	0,917	0,634	0,611	0,458	0,438	0,607	0,456	0,642
	R _a Richtung [µm]	0,571															
	R _a [µm]	0,583															
	R _{zi} [µm]	5,87	4,47	4,81	3,88	4,70	4,41	8,51	2,88	8,36	4,78	5,67	4,40	4,45	5,77	4,10	5,28
	R _z Richtung [µm]	4,941															
	R _z [µm]	5,146															
	R _{zi} max [µm]	7,81	5,82	6,05	5,54	9,31	5,61	14,30	3,48	13,20	5,98	8,28	6,26	7,24	8,96	6,28	8,51
	R _z max Richtung [µm]	7,240															
R _z max [µm]	7,664																
SVB abgeformt auf Gabbro	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	-1%															
	R _{ai} [µm]	0,141	0,177	0,181	0,211	0,254	0,201	0,149	0,201	0,227	0,211	0,221	0,226	0,372	0,118	0,159	0,170
	R _a Richtung [µm]	0,189															
	R _a [µm]	0,201															
	R _{zi} [µm]	1,49	1,97	3,17	2,44	3,12	2,06	1,52	1,88	3,29	2,62	2,92	2,30	3,18	1,63	1,24	1,68
	R _z Richtung [µm]	2,206															
	R _z [µm]	2,282															
	R _{zi} max [µm]	1,86	2,69	6,06	3,84	5,03	3,53	2,08	2,46	7,43	4,88	4,87	4,04	5,00	2,95	1,39	2,65
	R _z max Richtung [µm]	3,444															
R _z max [µm]	3,798																
SVB abgeformt auf Gabbro	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	1%															
	R _{ai} [µm]	1,002	1,036	1,033	0,935	1,284	1,345	1,008	0,916	1,393	1,199	1,901	1,052	0,757	0,776	0,850	0,913
	R _a Richtung [µm]	1,070															
	R _a [µm]	1,088															
	R _{zi} [µm]	6,26	6,61	6,14	6,95	8,45	8,72	8,09	7,84	9,42	8,01	11,90	8,64	4,46	5,69	6,50	6,47
	R _z Richtung [µm]	7,383															
	R _z [µm]	7,509															
	R _{zi} max [µm]	8,42	7,89	10,00	8,72	9,65	10,20	18,30	12,60	10,90	9,10	28,10	12,00	7,88	6,38	10,50	8,92
	R _z max Richtung [µm]	10,723															
R _z max [µm]	11,223																

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
	Messstrecke [mm]	5,6 mm															
	Messrichtung	X															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	0%															
SVB abgeformt auf Gabbro (+ PTFE-Spray)	R _{ai} [µm]	0,613	0,630	1,250	0,535	0,675	0,584	0,448	0,755	0,607	1,737	0,500	0,478	0,531	0,422	1,134	0,500
	R _a Richtung [µm]	0,686															
	R _a [µm]	0,712															
Alter der Probe: 1 Tag (Nr. 1)	R _{zi} [µm]	5,59	4,82	8,33	4,85	7,34	4,74	3,64	7,17	5,05	10,80	4,71	3,72	5,29	4,16	8,28	4,88
	R _z Richtung [µm]	5,810															
	R _z [µm]	5,836															
Nachbearbeitung: -	R _{zi max} [µm]	11,20	6,16	12,10	5,64	11,70	6,00	3,96	13,60	7,15	27,80	7,07	4,56	5,95	5,08	20,00	6,16
	R _{z max} Richtung [µm]	8,795															
	R _{z max} [µm]	9,633															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	4%															
SVB abgeformt auf Gabbro (+ PTFE-Spray)	R _{ai} [µm]	0,775	0,834	1,240	1,166	1,559	1,394	1,594	1,462	0,723	1,038	1,705	1,251	1,379	1,410	1,039	1,024
	R _a Richtung [µm]	1,253															
	R _a [µm]	1,225															
Alter der Probe: 1 Tag (Nr. 2)	R _{zi} [µm]	6,56	6,75	10,80	9,14	11,40	12,00	10,90	11,40	5,51	7,61	9,07	8,95	9,41	10,50	7,75	9,45
	R _z Richtung [µm]	9,869															
	R _z [µm]	9,200															
Nachbearbeitung: -	R _{zi max} [µm]	10,70	9,76	13,60	11,00	18,30	18,20	14,10	15,80	9,00	9,13	11,80	9,73	15,20	14,10	10,90	14,60
	R _{z max} Richtung [µm]	13,933															
	R _{z max} [µm]	12,870															

R_z der Abformlehren Kalk-Natron-Glas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8				
	Messstrecke [mm]	1,75 mm				X								1,75 mm							
	Messrichtung	X																Y			
	Kalibriert	Ja																			
	Korrekturwert	-1%																			
Abformlehre KNG	R _{ai} [µm]	0,026	0,010	0,006	0,006	0,019	0,011	0,009	0,008	0,012	0,020	0,006	0,007	0,010	0,009	0,012	0,008				
	R _a Richtung [µm]	0,012																0,011			
	R _a [µm]	0,011																			
	R _{zi} [µm]	0,28	0,07	0,05	0,05	0,11	0,07	0,05	0,06	0,09	0,19	0,05	0,06	0,07	0,06	0,09	0,06				
	R _z Richtung [µm]	0,093																0,084			
	R _z [µm]	0,088																			
Messung	R _{zi max} [µm]	0,98	0,08	0,06	0,08	0,13	0,09	0,06	0,08	0,14	0,42	0,06	0,07	0,09	0,08	0,11	0,08				
	R _{z max} Richtung [µm]	0,195																0,131			
	R _{z max} [µm]	0,163																			
	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8				
	Messstrecke [mm]	5,6 mm				X								5,6 mm				Y			
	Messrichtung	Ja																2%			
SVB abgeformt auf KNG	Kalibriert	Ja																			
	Korrekturwert	2%																			
	R _{ai} [µm]	0,181	0,219	0,164	0,197	0,201	0,183	0,251	0,200	0,172	0,188	0,189	0,195	0,188	0,258	0,217	0,254				
	R _a Richtung [µm]	0,200																0,208			
	R _a [µm]	0,204																			
	R _{zi} [µm]	1,54	2,32	1,52	2,05	2,31	1,82	2,20	1,94	1,80	1,59	2,05	1,74	1,87	2,84	2,18	2,53				
Alter der Probe: 7 Tage (Nr. 1) Nachbearbeitung: -	R _z Richtung [µm]	1,963																2,075			
	R _z [µm]	2,019																			
	R _{zi max} [µm]	2,33	3,45	2,34	2,96	3,93	2,05	3,94	2,46	2,37	2,27	2,73	3,08	2,46	5,46	3,10	3,69				
	R _{z max} Richtung [µm]	2,933																3,145			
	R _{z max} [µm]	3,039																			
	Kalibriert	Ja																1%			
SVB abgeformt auf KNG	Korrekturwert	1%																			
	R _{ai} [µm]	0,224	0,224	0,400	0,191	0,270	0,234	0,246	0,248	0,266	0,231	0,314	0,195	0,191	0,206	0,281	0,191				
	R _a Richtung [µm]	0,255																0,234			
	R _a [µm]	0,245																			
	R _{zi} [µm]	2,17	1,92	2,66	2,14	2,49	2,06	3,13	2,35	2,78	2,53	3,19	2,19	2,08	1,88	2,52	1,54				
	R _z Richtung [µm]	2,365																2,339			
Alter der Probe: 7 Tage (Nr. 2) Nachbearbeitung: -	R _z [µm]	2,352																			
	R _{zi max} [µm]	2,83	2,32	4,43	3,19	3,79	2,81	5,68	3,09	3,64	3,73	6,12	3,71	2,75	2,51	4,39	1,96				
	R _{z max} Richtung [µm]	3,518																3,601			
	R _{z max} [µm]	3,559																			
	Kalibriert	Ja																-2%			
	Korrekturwert	-2%																			
SVB abgeformt auf KNG (+ Aquapel)	R _{ai} [µm]	0,846	0,707	1,137	0,842	1,228	0,927	0,853	1,079	0,684	0,627	0,748	0,824	0,777	0,820	0,937	0,801				
	R _a Richtung [µm]	0,952																0,777			
	R _a [µm]	0,865																			
	R _{zi} [µm]	5,62	5,49	7,53	6,22	7,56	7,03	5,06	5,62	4,25	4,42	5,09	6,45	5,44	4,83	5,38	4,58				
	R _z Richtung [µm]	6,266																5,055			
	R _z [µm]	5,661																			
Alter der Probe: 1 Tag (Nr. 1) Nachbearbeitung: -	R _{zi max} [µm]	6,60	7,38	8,73	8,93	12,40	7,90	5,97	6,82	5,54	7,44	6,29	8,56	6,85	6,01	6,02	5,37				
	R _{z max} Richtung [µm]	8,091																6,510			
	R _{z max} [µm]	7,301																			
	Kalibriert	Ja																1%			
	Korrekturwert	1%																			
	R _{ai} [µm]	1,620	1,230	0,829	0,730	0,858	1,169	0,947	0,639	1,368	1,681	1,229	0,738	0,914	0,621	0,801	0,749				
SVB abgeformt auf KNG (+ Aquapel)	R _a Richtung [µm]	1,003																1,013			
	R _a [µm]	1,008																			
	R _{zi} [µm]	11,80	8,09	7,92	6,26	5,93	8,37	5,53	3,77	7,70	9,41	6,94	4,43	5,81	4,55	5,45	6,06				
	R _z Richtung [µm]	7,209																6,294			
	R _z [µm]	6,751																			
	R _{zi max} [µm]	13,70	10,60	10,60	9,62	7,97	15,00	7,63	4,00	11,90	12,20	11,50	5,76	10,60	4,84	7,91	7,61				
Alter der Probe: 1 Tag (Nr. 2) Nachbearbeitung: -	R _{z max} Richtung [µm]	9,890																9,040			
	R _{z max} [µm]	9,465																			

Tabelle C.4: Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Kalk-Natron-Glas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 2)

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
	Messstrecke [mm]					5,6 mm											
	Messrichtung					X											Y
SVB abgeformt auf KNG (+ PFTE - Spray)	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	3%															
	R_{ai} [μ m]	0,930	0,891	0,908	0,971	1,041	1,002	0,822	0,707	0,847	0,873	0,908	0,882	0,898	0,892	0,801	0,830
	R_a Richtung [μ m]	0,909															
	R_a [μ m]	0,888															
	R_{zi} [μ m]	6,37	5,59	6,00	5,75	6,57	5,74	5,02	4,49	5,45	5,15	5,20	5,05	5,34	5,19	4,74	4,93
	R_z Richtung [μ m]	5,691															
	R_z [μ m]	5,411															
	$R_{zi\ max}$ [μ m]	7,21	6,50	8,88	7,64	8,13	7,27	5,48	5,43	6,28	6,11	5,78	5,58	5,78	5,68	5,67	5,31
	$R_{z\ max}$ Richtung [μ m]	7,068															
SVB abgeformt auf KNG (+ PFTE - Spray)	$R_{z\ max}$ [μ m]	6,421															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	1%															
	R_{ai} [μ m]	0,850	1,310	0,984	0,902	0,852	0,915	0,884	0,957	0,824	0,848	0,791	0,741	0,742	0,649	0,626	0,752
	R_a Richtung [μ m]	0,957															
	R_a [μ m]	0,852															
	R_{zi} [μ m]	6,37	5,59	6,00	5,75	6,57	5,74	5,02	4,49	5,45	5,15	5,20	5,05	5,34	5,19	4,74	4,93
	R_z Richtung [μ m]	5,691															
	R_z [μ m]	5,411															
	$R_{zi\ max}$ [μ m]	7,21	6,50	8,88	7,64	8,13	7,27	5,48	5,43	6,28	6,11	5,78	5,58	5,78	5,68	5,67	5,31
SVB abgeformt auf KNG (+ Resist)	$R_{z\ max}$ Richtung [μ m]	7,068															
	$R_{z\ max}$ [μ m]	6,421															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	3%															
	R_{ai} [μ m]	1,385	1,416	1,247	1,045	2,007	1,661	1,183	1,527	1,664	2,123	1,101	0,769	1,268	1,287	0,844	1,381
	R_a Richtung [μ m]	1,434															
	R_a [μ m]	1,369															
	R_{zi} [μ m]	7,42	8,41	6,99	6,43	11,70	8,92	8,15	11,10	10,60	12,20	7,79	5,79	9,96	9,13	5,81	8,57
	R_z Richtung [μ m]	8,640															
	R_z [μ m]	8,686															
SVB abgeformt auf KNG (+ Resist)	$R_{zi\ max}$ [μ m]	9,01	10,20	10,10	8,66	14,60	11,90	10,90	17,30	12,90	16,40	11,10	8,15	12,20	11,90	8,91	14,90
	$R_{z\ max}$ Richtung [μ m]	11,584															
	$R_{z\ max}$ [μ m]	11,821															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	2%															
	R_{ai} [μ m]	2,816	1,822	2,151	1,486	2,436	2,597	1,509	1,778	2,882	2,476	1,988	2,393	2,031	1,756	1,615	1,812
	R_a Richtung [μ m]	2,074															
	R_a [μ m]	2,097															
	R_{zi} [μ m]	16,40	11,60	12,10	9,56	15,30	15,60	10,40	9,63	17,10	14,30	12,30	14,00	11,10	11,10	10,90	11,10
	R_z Richtung [μ m]	12,574															
SVB abgeformt auf KNG (+ Resist)	R_z [μ m]	12,656															
	$R_{zi\ max}$ [μ m]	18,70	13,40	13,90	10,30	17,30	20,90	11,90	10,90	20,40	16,30	17,20	14,90	11,60	13,40	12,60	12,30
	$R_{z\ max}$ Richtung [μ m]	14,663															
	$R_{z\ max}$ [μ m]	14,750															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	2%															
	R_{ai} [μ m]	2,816	1,822	2,151	1,486	2,436	2,597	1,509	1,778	2,882	2,476	1,988	2,393	2,031	1,756	1,615	1,812
	R_a Richtung [μ m]	2,074															
	R_a [μ m]	2,097															
	R_{zi} [μ m]	16,40	11,60	12,10	9,56	15,30	15,60	10,40	9,63	17,10	14,30	12,30	14,00	11,10	11,10	10,90	11,10

Tabelle C.5: Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Borosilicatglas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 1)

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
	Messstrecke [mm]	1,75 mm															
	Messrichtung	X															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	0%															
Abformlehre BSG	R _{ai} [µm]	0,012	0,009	0,031	0,036	0,006	0,007	0,007	0,009	0,012	0,011	0,011	0,007	0,005	0,006	0,007	0,006
	R _a Richtung [µm]	0,015															
	R_a [µm]	0,011															
	R _{zi} [µm]	0,08	0,07	0,21	0,26	0,05	0,05	0,06	0,07	0,10	0,07	0,07	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05
	R _z Richtung [µm]	0,106															
	R_z [µm]	0,084															
	R _{zi max} [µm]	0,12	0,20	0,39	0,55	0,08	0,07	0,07	0,13	0,30	0,12	0,10	0,09	0,05	0,10	0,06	0,06
	R _{z max} Richtung [µm]	0,201															
Messung	R_{z max} [µm]	0,156															
	Messstrecke [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
	Messrichtung	5,6 mm															
	Messrichtung	X															
SVB abgeformt auf BSG	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	2%															
	R _{ai} [µm]	0,192	0,196	0,217	0,183	0,199	0,233	0,208	0,180	0,180	0,188	0,186	0,194	0,194	0,194	0,167	0,169
	R _a Richtung [µm]	0,201															
	R_a [µm]	0,193															
	R _{zi} [µm]	2,57	2,35	2,73	2,05	2,85	2,64	2,46	1,92	1,95	2,25	2,04	1,89	2,03	2,14	1,29	1,43
	R _z Richtung [µm]	2,446															
	R_z [µm]	2,162															
	R _{zi max} [µm]	3,40	3,70	4,17	2,49	4,80	4,68	3,15	2,48	2,41	3,43	2,96	2,14	2,60	2,83	1,89	2,52
	R _{z max} Richtung [µm]	3,609															
	R_{z max} [µm]	3,103															
	Kalibriert	Ja															
SVB abgeformt auf BSG	Korrekturwert	-1%															
	R _{ai} [µm]	0,194	0,189	0,175	0,171	0,203	0,205	0,227	0,200	0,186	0,251	0,192	0,258	0,181	0,235	0,166	0,193
	R _a Richtung [µm]	0,196															
	R_a [µm]	0,202															
	R _{zi} [µm]	2,05	2,01	1,74	1,73	2,03	1,91	3,01	2,18	2,66	2,33	2,19	3,00	2,27	2,60	1,80	2,31
	R _z Richtung [µm]	2,083															
	R_z [µm]	2,239															
	R _{zi max} [µm]	2,68	2,68	2,38	2,24	2,93	2,42	4,20	3,87	3,90	4,86	3,52	6,35	2,70	5,11	2,32	3,43
R _{z max} Richtung [µm]	2,925																
	R_{z max} [µm]	3,474															
	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	-1%															
	R _{ai} [µm]	0,750	0,546	0,628	1,102	0,653	0,808	0,841	0,441	0,450	0,587	0,952	0,502	0,840	0,483	0,914	1,212
SVB abgeformt auf BSG (+ Aquapel)	R _a Richtung [µm]	0,721															
	R_a [µm]	0,732															
	R _{zi} [µm]	4,07	4,09	3,78	7,23	4,80	4,11	6,11	2,99	3,49	4,36	6,46	4,02	4,99	3,37	7,15	7,37
	R _z Richtung [µm]	4,648															
	R_z [µm]	4,899															
	R _{zi max} [µm]	5,26	5,48	7,21	8,71	5,77	6,25	9,55	3,50	4,99	5,71	8,93	5,31	10,90	4,01	11,10	12,80
	R _{z max} Richtung [µm]	6,466															
	R_{z max} [µm]	7,218															
SVB abgeformt auf BSG (+ Aquapel)	Kalibriert	Ja															
	Korrekturwert	1%															
	R _{ai} [µm]	1,470	1,474	1,723	1,559	0,884	1,305	0,773	1,543	0,753	1,545	1,805	1,206	1,970	1,611	1,537	1,808
	R _a Richtung [µm]	1,341															
	R_a [µm]	1,435															
	R _{zi} [µm]	11,80	9,57	7,39	9,41	10,80	10,20	9,65	11,90	10,10	7,92	7,88	9,05	6,85	7,46	9,88	11,30
	R _z Richtung [µm]	10,090															
	R_z [µm]	9,448															
	R _{zi max} [µm]	13,10	20,80	12,30	13,50	10,60	17,10	9,38	15,40	7,68	15,90	15,10	11,70	15,50	16,80	13,10	14,60
	R _{z max} Richtung [µm]	14,023															
	R_{z max} [µm]	13,910															

Tabelle C.6: Übersicht der messtechnisch erfassten Mittenrauwerte R_a und gemittelten Rautiefen R_z der Abformlehren Borosilicatglas und der abgeformten SVB-Oberflächen (Teil 2)

Messung	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Messstrecke [mm]		5,6 mm												5,6 mm			
Messrichtung		X												Y			
Kalibriert	Ja																
Korrekturwert	6%																
R _{al} [µm]	0,614	0,725	0,693	0,724	0,713	0,848	1,022	1,218	0,857	0,775	0,874	0,820	0,749	0,824	0,763	1,290	
R _a Richtung [µm]		0,820												0,869			
R _a [µm]		0,844															
R _{z1} [µm]	3,82	4,58	4,63	4,73	5,03	5,66	7,22	6,91	6,33	6,13	6,25	6,07	5,16	6,42	5,12	7,24	
R _z Richtung [µm]		5,323												6,090			
R _z [µm]		5,706															
R _{z1 max} [µm]	5,99	5,07	5,44	7,23	5,33	6,73	8,37	7,72	7,20	8,57	7,81	8,91	6,01	8,59	7,67	8,43	
R _{z max} Richtung [µm]		6,485												7,899			
R _{z max} [µm]		7,192															
Kalibriert	Ja																
Korrekturwert	1%																
R _{al} [µm]	0,954	0,829	1,854	1,797	1,106	0,982	1,774	1,704	1,836	1,135	1,306	1,318	1,406	1,248	1,726	1,359	
R _a Richtung [µm]		1,375												1,417			
R _a [µm]		1,396															
R _{z1} [µm]	7,18	5,81	10,10	10,20	8,74	8,45	8,68	9,89	12,00	9,58	10,70	9,98	8,68	8,11	8,94	8,27	
R _z Richtung [µm]		8,631												9,533			
R _z [µm]		9,082															
R _{z1 max} [µm]	7,52	9,14	12,40	13,40	11,70	13,80	10,90	11,90	15,30	11,00	11,70	12,00	10,10	10,60	10,70	8,56	
R _{z max} Richtung [µm]		11,345												11,245			
R _{z max} [µm]		11,295															
Kalibriert	Ja																
Korrekturwert	0%																
R _{al} [µm]	1,886	1,966	1,953	1,447	1,903	1,858	1,199	1,831	2,516	1,838	0,866	1,912	1,234	1,009	2,074	1,998	
R _a Richtung [µm]		1,755												1,681			
R _a [µm]		1,718															
R _{z1} [µm]	10,20	10,70	9,95	9,44	9,91	9,65	8,03	10,80	12,70	10,60	6,22	10,50	8,07	6,79	11,40	10,90	
R _z Richtung [µm]		9,835												9,648			
R _z [µm]		9,741															
R _{z1 max} [µm]	13,80	15,60	12,20	14,70	12,60	15,30	11,30	17,00	16,20	13,70	8,89	13,40	12,30	10,60	15,00	15,30	
R _{z max} Richtung [µm]		14,063												13,174			
R _{z max} [µm]		13,618															
Kalibriert	Ja																
Korrekturwert	1%																
R _{al} [µm]	1,612	1,220	1,206	1,356	1,480	1,395	1,351	1,720	1,466	1,218	0,821	0,992	0,790	1,148	1,387	1,602	
R _a Richtung [µm]		1,418												1,178			
R _a [µm]		1,298															
R _{z1} [µm]	11,00	9,57	7,39	9,41	10,80	10,20	9,65	11,90	10,10	7,92	7,88	9,05	6,85	7,46	9,88	11,30	
R _z Richtung [µm]		9,990												8,805			
R _z [µm]		9,398															
R _{z1 max} [µm]	12,80	13,80	9,04	12,90	15,80	11,20	9,87	16,90	12,10	8,54	12,70	11,70	9,33	9,58	11,80	15,70	
R _{z max} Richtung [µm]		12,789												11,431			
R _{z max} [µm]		12,110															

Anhang D – Technische Daten

13 Technische Daten

Perthometer M1 und M1 CNOMO: Grunddaten

Meßprinzip	Tastschnittverfahren mit dem Vorschubgerät PFM oder PFM 2
Meßbereiche	100 µm (0,00394 in) 150 µm (0,00591 in)
Profilauflösung	12 nm
Kalibrierfunktion	dynamisch
Maßeinheit	wählbar: µm, µin
Sprachen	wählbar: Deutsch, Englisch, Französisch, Italienisch, Spa- nisch, Portugiesisch, Niederländisch, Schwedisch, Tschechisch, Russisch, Polnisch, Japanisch, Chi- nesisch, Koreanisch
Sperre für Geräteeinstellungen	wählbar, gegen ungewolltes Ändern der Geräteeinstellungen
Tastenfeld	Folientastatur mit 8 Druckpunktasten
Anzeige	Flüssigkristallanzeige (LCD) mit anwendungs- spezifischem Symbolbereich und Textfeld
Drucker	Thermodrucker, graphikfähig, Auflösung: 384 Punkte/horizontale Linie, Textausgabe: 20 Zeichen/Zeile
Druckgeschwindigkeit	ca. 6 Zeilen/Sekunde entspr. ca. 25 mm/s
Verwendbares Thermopapier	Ø 40,0 mm -1,0 mm, Breite 57,5 mm -0,5 mm, außen beschichtet
Schnittstelle	V.24 (RS 232 C)
Spannungsversorgung	über eingebauten NiCd-Akkumulator mit Power- management ³⁶ , für ca. 1000 Messungen (abhängig von Anzahl und Länge der Protokollausdrucke) oder über Netzgerät (s. u.)
Anschlüsse	Vorschubgerät ³⁷ , Schnittstelle V.24, Netzgerät
Schutzart	IP 40
Arbeits-/Betriebstemperatur	+5 °C bis +40 °C
Lager- und Transporttemperatur	-15 °C bis +55 °C
Rel. Luftfeuchte	30 % bis 85 %
Maße (L × B × H)	190 mm × 170 mm × 75 mm
Masse	ca. 900 g

³⁶ Die Lebensdauer des Akkus hängt von den Gebrauchsbedingungen ab. Im allgemeinen sind ca. 1000 Lade- und Entladevorgänge möglich.

³⁷ Die Vorschubgeräte PFK und PFK 2 können nicht angeschlossen werden.

Perthometer M1: Daten zu Messung und Auswertung

Filter	phasenkorrektes Profilfilter (Gauß-Filter) gemäß DIN EN ISO 11562		
Cutoffs λ_c	0,250 mm (0,010 in)	0,800 mm (0,032 in)	2,500 mm (0,100 in)
Taststrecken L_t	1,750 mm (0,070 in)	5,600 mm (0,224 in)	17,50 mm (0,700 in)
Gesamtmeßstrecken l_m	1,250 mm (0,050 in)	4,000 mm (0,160 in)	12,50 mm (0,500 in)
Anzahl n der Einzelmeßstrecken	wählbar: 1 bis 5		
Verkürzter Cutoff	wählbar		
Automatische normgemäße Einstellung von Cutoff und Taststrecke	wählbar		
Normen	wählbar: ISO (DIN), JIS		
Kenngrößen gemäß ISO/SEP gemäß JIS	R_a , R_z , R_{max} , P_c		
	R_a , R_z , R_y		
Schnittlinien C1/C2 für Spitzenzahl P_c	wählbar: 0,1 μm /-0,1 μm bis 50 μm /-50 μm (4 μin /-4 μin bis 2000 μin /-2000 μin)		
Protokollinhalte	Protokollkopf, Kenngrößen, R-Profil		
Vertikalmaßstab	automatisch		
Horizontalmaßstab	abhängig vom normgemäßen Cutoff		

Perthometer M1 CNOMO: Daten zu Messung und Auswertung

Taststrecken	1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm (0,040 in, 0,080 in, 0,160 in, 0,320 in, 0,480 in, 0,640 in)
Kenngrößen	R , A_r , R_x , W
Operatoren für Auswertung	$A = 0,5$ mm, $B = 2,5$ mm
Protokollinhalte	Protokollkopf, Kenngrößen, P-Profil
Vertikalmaßstab	automatisch

Vorschubgerät PFM

Tastrichtung	längs zum Vorschubgerät
Taststrecke	max. 17,5 mm (0,689 in), am Perthometer einstellbar
Tastgeschwindigkeit	0,5 mm/s
Rücklaufgeschwindigkeit	ca. 1,2 mm/s
Tasterauflagekraft	0,3 N in Normallage, 0,15 N über Kopf
Tasteraufnahme	für alle Taster der Typenreihen „NHT“ und „NT“ Koaxialbuchse Ø 3 mm
Maße (Ø × L)	24 mm × 112,5 mm (ohne Taster)
Masse	ca. 250 g
Länge des Verbindungskabels	ca. 1,5 m

Taster NHT 6-100

Ausführung	Einkufentaster
Meßbereich	100 µm
Gleitkufe	sphärische Form, Radius in Tastrichtung 25 mm, Radius quer zur Tastrichtung 2,9 mm, Gleitpunkt 0,8 mm vor der Tastspitze
Tastspitzengeometrie	Spitzenradius 2 µm, Kegelwinkel 90° (gemäß DIN EN ISO 3274)
Meßkraft	ca. 0,7 mN (gemäß DIN EN ISO 3274)
Einsatzmöglichkeiten	für zylindrische und ebene Meßobjekte, für Bohrungen ab 6 mm Ø bis 17 mm Tiefe, für Nuten ab 3 mm Breite; min. Länge des Meßobjekts = Taststrecke + 1 mm

Netzgerät

Eingang	90 V bis 264 V / 260 mA, 47 Hz bis 63 Hz
Netzadapter	auswechselbar: für Europa, Großbritannien, USA/Japan
Ausgang	12 V = ± 5 % / 0,8 A
Schutzart	IP 40
Schutzklasse	II gemäß IEC 950
Maße (L × B × H)	87,5 mm × 51,5 mm × 34 mm
Masse	ca. 140 g
Länge der Ladeleitung	ca. 2 m

Die verwendeten Materialien sind gemäß DIN 6120 für ein sortenreines Recycling gekennzeichnet. Altgeräte werden zurückgenommen und fachgerecht entsorgt. Gemäß der Verpackungsverordnung vom März 1992 wird das Perthometer-Set in einer wiederverwendbaren Mehrzweckverpackung geliefert. Das Styropor ist FCKW-frei geschäumt.

Anhang E – Literaturstellen

Tabelle E.1: Übersicht der Literaturstellen die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden

Nr.	Titel	Autor	Schwerpunkt			
			Selbstverdichtender Beton	Luftführung	Materialigenschaften	Mes- und Prüfverfahren
1	Thermische Eigenschaften und Langzeitstabilität von Mineral-gusswerkstoffen	Sarnow, N.			X	X
2	Luftlagerungen: Grundlagen und Anwendungen	Bartz, Wilfried J.		X		
3	Aerostatische Führungen und Luftlagerungen	Donat, Horst		X		
4	Luftlagerungen	Wiemer, Arthur		X		
5	Konstruktionselemente der Feinmechanik	Krause, W.				
6	Querdehnung von selbstverdichtendem Beton	Pereyra, Maria Noel	X			X
7	Eigenschaften selbstverdichtender Betone	Lohaus, L. ; Schießl, P.	X			X
8	Der Einfluss von Betonzusatzstoffen auf die Hydratation und Dauerfestigkeit von SVB	Friebert, Marco	X			
9	Robustheit von selbstverdichtendem Beton	Höveling, Holger	X		X	
10	Selbstverdichtender Beton	Brameshuber, Wolfgang	X		X	
11	Casting of self compacting concrete	Skarendahl, A ; Billberg, P.	X			
12	Selbstverdichtender Beton - ein weiterer Entwicklungsschritt	Grube, Horst	X			
13	Structural Glass and Glass Structures - Glass - Concrete Composite	Freytag, B.	X			
14	Capillary water absorption of SSC und different curing conditions	Turk, K.	X		X	X
15	The effect of measuring procedure on the apparent rheological propertie	Geiker, Mette R.	X			
16	Selbstverdichtender Beton (TeilI) Herstellung, Anwendung und Dauerhaftigkeit von SVB	Hoffmann, C. ; Leemann, A	X			X
17	Rapid testing method for segregation resistance of SCC	Bui, V. K.	X		X	
18	Self-Compacting Concrete	De Schutter, Bartos,	X			
19	Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton	Graubner, Carl-Alexander	X		X	
20	Betontechnischer Bericht - SVB	Grube, Horst	X			X
21	Long term behavior of SCC reinforced beams	-	X		X	X
22	Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton	Schießl, Angelika	X		X	
23	Selbstverdichtender Beton in der Praxis	Breitenbücher, Rolf	X		X	
24	Bausstoffe für tragende Bauteile Band 2: Beton Mauerwerk	Wesche, K			X	X
25	DIN EN 206-1:2000					X
26	DIN 1048-2:1991					X
27	DIN 1048-4:1991					X
28	DIN 1045-1:2008					X
29	DIN EN 12390-1:2001					X
30	DIN EN 12390-2:2001					X
31	DIN EN 12390-3:200					X
32	DIN EN 12390-4:2000					X
33	DIN EN 12390-5:2001					X
34	DIN EN 12390-6:2001					X

Thesen zur Bachelorarbeit
„Grundgestell aus hydraulisch gebundenem Beton mit abgeformten
Führungsflächen für aerostatische Führungen“
von René Bernau

1. Das direkte Abformen von HGB bietet durch günstigere Materialkosten und der nicht notwendigen spanenden Nachbearbeitung der abgeformten SVB-Oberflächen einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber dem Stand der Technik.
2. Zwischen den Abformlehren und dem SVB existiert ein Haftverbund, deren messtechnisch erfassten Kennwerte je Abformlehre und auch innerhalb der Versuchsreihen selbst schwanken.
3. Gabbro „*Nero Impala*“ kann als Abformlehre für das direkte Abformen eingesetzt werden, verursacht auf der abgeformten SVB-Oberfläche feine, dünne Spitzen. Spitzen, welche höher als der Luftspalt h sind, müssen nachträglich abgetragen werden.
4. Auf Borosilicatglas und Kalk-Natron-Glas können SVB-Oberflächen mit einer Rauheit abgeformt werden, die für Luftlagerelemente geeignet ist.
5. Der Einsatz von Trennmitteln auf der Oberfläche der Abformlehren bewirkt eine Vergrößerung der Rauheit auf den abgeformten SVB-Oberflächen.
6. Der Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z der Abformlehren und der abgeformten SVB-Oberflächen wurden über eine definierte Messstrecke l_n messtechnisch erfasst.
7. Der Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z sind für die Beurteilung der abgeformten SVB-Oberflächen im Hinblick auf die Eignung als Führungsfläche für aerostatische Führungen nur eingeschränkt Aussagekräftig. Krater in der abgeformten SVB-Oberfläche, welche für das Luftlagerelement in der Regel ungefährlich sind, vergrößern die R_a - und R_z -Werte und sprechen gegen den Einsatz als Führungsfläche.
8. Für eine endgültige Aussage über die Eignung der abgeformten SVB-Oberfläche als Führungsfläche für aerostatische Führungen sind lokale Ebenheitsmessungen notwendig.